Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXI Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 8
Международная научная конференция

«СИБОПТИКА-2025. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ»

Новосибирск
СГУГиТ
2025

УДК 528
С26

Ответственные за выпуск:

доцент, директор ИОиТИБ СГУГиТ, г. Новосибирск
А. В. Шабурова

Кандидат технических наук, директор КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск
П. С. Завьялов

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики СГУГиТ, г. Новосибирск
Д. С. Михайлова

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики СГУГиТ, г. Новосибирск
С. Л. Шергин

Старший преподаватель кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии СГУГиТ, г. Новосибирск
А. В. Макеев

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры фотоники и приборостроения СГУГиТ, г. Новосибирск
Д. М. Никулин

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXI Международный научный конгресс, 21–22 мая 2025 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 8: Международная научная конференция «СибОптика-2025. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». – Новосибирск : СГУГиТ, 2025. – 396 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2025-8

В сборнике опубликованы материалы XXI Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь», представленные на Международной научной конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

Материалы публикуются в авторской редакции

Издание может содержать сведения об иностранных агентах

УДК 528

© СГУГиТ, 2025

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК 681.7.02
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-3-7

М. Е. Арапова[1], Е. Ю. Кутенкова[1]✉

Фотонные кристаллы в оптическом приборостроении

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию фотонных кристаллов и их влиянию на оптическое приборостроение. Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению показателя преломления, позволяют осуществлять прецизионный контроль над распространением света, открывая новые перспективы в разработке высокоэффективных оптических компонентов. В работе рассматриваются фундаментальные принципы функционирования фотонных кристаллов, а также их многогранное применение: создание компактных и высокоэффективных оптических фильтров, разработка волноводов с минимальными потерями энергии, конструирование лазеров с улучшенными параметрами излучения, и создание высокочувствительных оптических сенсоров. Представлен анализ последних научных достижений, демонстрирующий огромный потенциал фотонных кристаллов для создания инновационных оптических устройств нового поколения. Работа подчеркивает актуальность дальнейших исследований в этой быстро развивающейся области, которая обещает революционизировать различные сферы, от телекоммуникаций до биомедицинских технологий. Перспективы применения фотонных кристаллов выходят далеко за рамки сегодняшних достижений, открывая новые возможности для фундаментальной науки и технологического прогресса.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, оптическое приборостроение, показатель преломления

M. E. Arapova[1], E. Yu. Kutenkova[1]✉

Photonic crystals in optical instrumentation

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

Abstract. This work is devoted to the study of photonic crystals and their influence on optical instrumentation. Photonic crystals, due to periodic changes in the refractive index, allow precision control over the propagation of light, opening up new prospects in the development of highly efficient optical components. The paper discusses the fundamental principles of the functioning of photonic crystals, as well as their multifaceted applications: the creation of compact and highly efficient optical filters, the development of waveguides with minimal energy loss, the design of lasers with improved radiation parameters, and the creation of highly sensitive optical sensors. An analysis of the latest scientific achievements is presented, demonstrating the enormous potential of photonic crystals for creating innovative optical devices of a new generation. The work highlights the relevance of further research in this rapidly developing field, which promises to revolutionize various fields, from telecommunications to biomedical technologies. The prospects of using photonic crystals go far beyond today's achievements, opening up new opportunities for fundamental science and technological progress.

Keywords: photonic crystals, optical instrumentation, refractive index

Введение

Фотонные кристаллы представляют собой уникальные материалы с периодической структурой, которые способны контролировать движение света на на-

ноуровне. Их применение в оптическом приборостроении открывает новые горизонты для разработки высокоэффективных и компактных оптических устройств. В данной статье рассматривается структура фотонных кристаллов, методы их создания, примеры применения и их роль в оптическом приборостроении [1–5].

Целью данной работы является обзор существующих методов создания и применения фотонных кристаллов, анализ их преимуществ и ограничений, а также прогнозирование перспектив дальнейшего развития этой области для решения задач современного приборостроения.

Методы и материалы

Фотонные кристаллы могут быть изготовлены различными методами, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества:

– самопроизвольное формирование: этот метод основан на использовании коллоидных частиц, находящихся в жидкости. По мере испарения жидкости частицы осаждаются в объеме, формируя трехмерные структуры. Таким образом, происходит естественное упорядочение частиц, что позволяет создавать фотонные кристаллы с заданными параметрами;

– сотовый метод: в данном подходе жидкость, содержащая коллоидные частицы, фильтруется через маленькие поры. Скорость формирования фотонного кристалла определяется скоростью течения жидкости, однако при высыхании таких кристаллов может возникать ряд дефектов, что влияет на оптические характеристики;

– травление: этот метод использует пучки сфокусированных ионов, чаще всего ионов Ga, для удаления материала. Путем травления можно добиться высокой точности и достижения сложных форм фотонных кристаллов без использования фотолитографии;

– голографические методы: основаны на принципах голографии, где интерференция двух или более когерентных волн приводит к изменению коэффициента преломления в пространственных направлениях. Этот метод позволяет создавать периодические структуры с высокой степенью контроля;

– литография: при помощи пучка электронов: хотя этот метод является дорогим, он обеспечивает высокую точность при создании двумерных фотонных кристаллов. Фоторезист облучается пучком электронов в определенных участках, позволяя изготовить сложные маски для дальнейшего формирования кристаллов.

При изготовлении фотонных кристаллов используются различные материалы:

– соединения A_3B_5: основные материалы современной оптоэлектроники, широко применяемые для создания фотонных кристаллов благодаря своей высокой эффективности и подходящим оптическим свойствам;

– кремний: пористый кремний рассматривается как перспективный оптический материал для интегрированных оптоэлектронных систем. Однако его

сильное поглощение в видимом диапазоне ограничивает использование кремниевых фотонных кристаллов в ближней и средней инфракрасных областях спектра;

– искусственные опалы: используются для формирования трехмерных фотонных кристаллов, где применяются монодисперсные диэлектрические частицы, такие как оксид кремния или частицы латекса;

– фосфид индия и оксид титана: Эти материалы подходят для создания фотонных кристаллов, предлагая хорошие оптические характеристики и стабильность;

– кремний, легированный германием: обладает гексагональной решеткой, что обеспечивает ему прямую запрещенную зону, делая этот материал пригодным для создания эффективных лазеров.

Фотонные кристаллы могут быть изготовлены в одном, двух или трех измерениях. Одномерные структуры кристаллов создаются из нескольких тонких слоев пленок, укладываемых друг на друга. Двумерные кристаллы получают с помощью фотолитографии или сверления отверстий в соответствующих подложках. Трехмерные фотонные кристаллы изготавливаются, например, с применением сверления исходных материалов под разными углами, наложения нескольких двумерных слоев, с использованием лазерных технологий, что позволяет получить кристаллы сложных и разнообразных форм.

Результаты и обсуждения

Фотонные кристаллы представляют собой уникальные структуры, способные управлять прохождением света благодаря своей периодической структуре. В ходе исследования анализировались функциональные характеристики фотонных кристаллов, включая их светопропускание, отражательную способность и спектральные свойства.

В ходе изученных экспериментов была проанализирована эффективность нескольких методов создания фотонных кристаллов. Метод самопроизвольного формирования продемонстрировал хорошие результаты в создании трехмерных структур, обеспечивая однородное распределение частиц и превосходные оптические характеристики. Однако одновременно было замечено, что при использовании этого метода сложность в контроле размеров частиц может привести к язычковым дефектам в структуре, что негативно сказывается на ее стабильности.

Сотовый метод показал свою скорость и простоту, однако при высыхании образованных кристаллов формировались дефекты, значительно влияющие на светопропускание. Для создания более стабильных структур требуются дополнительные этапы, такие как обработка или постобработка, что увеличивает общий временной и ресурсный расходы.

Травление и литография электронами, хотя и требуют больших затрат для получения фотонов, обеспечили наивысшую точность среди изученных методов. Изготовленные фотонные кристаллы отличались низким уровнем дефектов и высокими показателями отражательной способности. Эти методы наилучшим об-

разом подходят для получения сложных оптических устройств, однако их высокая себестоимость ограничивает применение в массовом и крупносерийном производстве.

Анализ спектральных характеристик печатаемых фотонных кристаллов показал, что максимальные значения отражательной способности наблюдаются в диапазонах, совпадающих с запрещенными зонами, которые были рассчитаны с использованием теории фотонных кристаллов. Возможность наложения нескольких двумерных слоев друг на друга позволяет изготавливать сложные структуры с широкой полосой запрещенных частот, что открывает новые возможности для применения в фотонных пристроях, таких как лазеры, фильтры и переключатели.

Фотонные кристаллы, созданные с использованием вышеописанных методов, обладают несколькими преимуществами в контексте оптического приборостроения. Высокая эффективность в управлении световым потоком делает их перспективными для использования в оптических сенсорах, где требуется высокая чувствительность и точность. Также они могут быть использованы в разработке интегрированных компактных и миниатюрных фотонных систем. В то же время, необходимо учитывать и ограничения. Например, использование пористого кремния в видимом диапазоне ограничено высоким уровнем поглощения. Это подчеркивает необходимость дальнейших исследований и разработки новых материалов, которые смогут более эффективно работать в широком диапазоне длин волн.

Заключение

Фотонные кристаллы представляют собой важный шаг вперед в области оптического приборостроения, обеспечивая новые возможности для управления светом на наноуровне. Исследования, проведенные в данной статье, продемонстрировали высокую эффективность различных методов синтеза, таких как самопроизвольное формирование, сотовый метод, травление и литография с использованием пучков электронов. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому необходим обоснованный выбор подходящего варианта в зависимости от задач и требований конкретного применения.

Дальнейшие исследования по этой тематике необходимы для решения текущих задач, таких как разработка и изготовление новых материалов с улучшенными оптическими свойствами и снижение производственных затрат. Это позволит расширить применение фотонных кристаллов в реальных оптических системах, что открывает перспективы для создания новых технологий и устройств в области интегрированной оптоэлектроники.

В итоге, фотонные кристаллы представляют собой мощный инструмент, способный значительно изменить современные оптические устройства и системы. Их влияние на будущее оптического приборостроения будет продолжать расти, открывая новые горизонты для научных исследований и коммерческих приложений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фотонные кристаллы. – Текст : электронный // chem.msu: сайт. – URL: https://www.chem.msu.ru/rus/teaching/goodilin1/photo.pdf?ysclid=m9n00h3k6q362848707 (дата обращения: 21.04.25).

2. Фотонный кристалл – Текст : электронный // wikipedia: сайт. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотонный_кристалл (дата обращения: 21.04.25).

3. Дьяченко, П. В. Метаматериалы и фотонные кристаллы. – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т. им. С. П. Королева, 2012 – 63 с. – Текст : электронный // repo. ssau: сайт. – URL: https://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-izdaniya/Metamaterialy-i-fotonnye-kristally-Elektronnyi-resurs-nauchobrazovat-modul-v-sisteme-distanc-obucheniya-MOODLE-70900/1/Дьяченко%20П.%20Н.%20Метаматериалы.pdf (дата обращения: 22.04.25). – Режим доступа: свободный.

4. 6 фактов об искусственно созданных структурах, обладающих свойствами обычных кристаллов – Текст : электронный // postnauka: сайт. – URL: https://postnauka.org/faq/27782 (дата обращения: 21.04.25).

5. Яблонович Эли PHOTONIC CRYSTALS: SEMICONDUCTORS OF LIGHT / Эли Яблонович // Фотонные кристаллы, 2001 – № 6 – с. 47-53.

© М. Е. Арапова, Е. Ю. Кутенкова, 2025

УДК 629.7
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-8-13

А. М. Бахтиярова[1]✉, В. Р. Костылева[1], М. С. Исмаилова[1], Т. В. Ларина[1]

От Земли до звезд: новые материалы, преодолевающие пределы космических технологий

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: bakhtiyarova7207@gmail.com

Аннотация. На протяжении десятилетий космические исследования вызывают у нас восхищение тем, как человечество осваивает просторы Вселенной. Со временем новые технологии изменили подход к проектированию и созданию космических кораблей. Ракеты изготавливают из различных материалов, каждый из которых подбирается в зависимости от специфических требований и условий эксплуатации в космосе. Актуальность поиска новых материалов связана с улучшением определенных свойств и использованием этих материалов в различных эксплуатационных условиях. Важное значение в ракетостроении имеет масса космического аппарата, поэтому главная цель использования новых материалов: увеличение полезной массы за счет снижения веса самой ракеты. В статье представлены виды материалов в конструкциях космических аппаратов, а также основные требования к материалам, из которых изготавливают камеры сгорания, створки реактивных сопел, корпусных деталей камер сгорания.

Ключевые слова: космические материалы, ракетостроение, сплавы, композиты

A. M. Bakhtiyarova[1]✉, V. R. Kostyleva[1], M. S, Ismailova[1], T. V. Larina[1]

From Earth to the stars: new materials that overcome the limits of space technology

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,Russian Federation
e-mail: bakhtiyarova7207@gmail.com

Abstract. For decades, space exploration has inspired us to marvel at how humanity has explored the vastness of the Universe. Over time, new technologies have changed the approach to designing and building spacecraft. Rockets are made from a variety of materials, each of which is selected depending on the specific requirements and operating conditions in space. The relevance of finding new materials is associated with improving certain properties and using these materials in various operating conditions. The mass of a spacecraft is of great importance in rocket engineering, so the main goal of using new materials is to increase the useful mass by reducing the weight of the rocket itself. The article presents the types of materials in spacecraft designs, as well as the main requirements for the materials from which combustion chambers, jet nozzle flaps, and combustion chamber body parts are made.

Keywords: space materials, rocket engineering, alloys, composites

Введение

Согласно уравнению Циолковского, приведенному ниже, масса ракеты – важная характеристика.

$$V_p = \omega \times ln\left(\frac{m_p + m_г}{m_p}\right), \quad (1)$$

где V_p – скорость, приобретаемая ракетой после истечения всех газов из сопла реактивного двигателя; ω – скорость истечения газов из двигателя ракеты; m_p – масса конструкции ракеты; $m_г$ – масса газов, отброшенных ракетой.

Масса конструкции ракеты требует использования разные материалы, а они в свою очередь должны обладать определенными механическими и химическими свойствами, удовлетворяющими условиям эксплуатации ракет [1, 2].

Изделия космических аппаратов должны быть прочными, легкими, выдерживать как сверхнизкие, так и сверхвысокие температуры. Ряду таких свойств соответствует небольшая часть сплавов и материалов [3]. На рисунке ниже представлены основные материалы, использующиеся в космической индустрии (рис. 1).

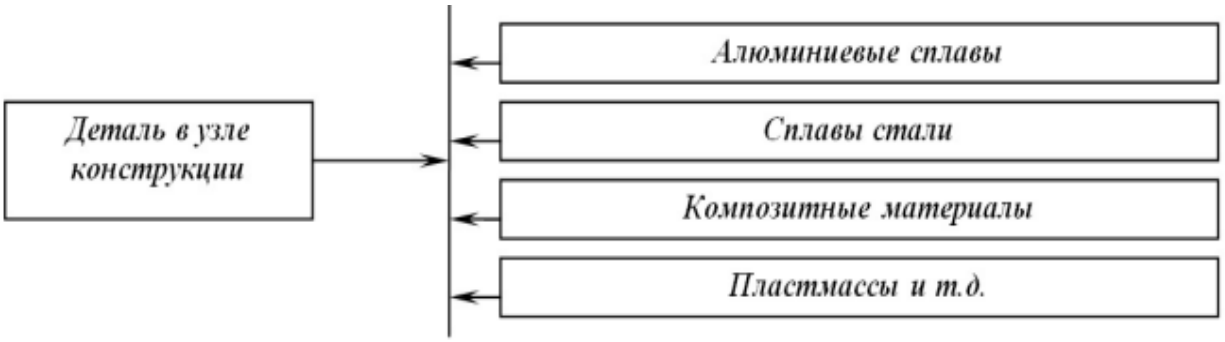


Рис. 1. Виды материалов в конструкциях космических аппаратов

Материалы в конструкциях космических аппаратов должны обладать высокими жесткостью и способность конструкции сопротивляться разрушению и деформации.

Для увеличения прочности и жесткости конструкции космических аппаратов изменяется ее форма, что приводит к увеличению массы изделия.

Но благодаря созданию новых материалов, а именно композитов, можно делать переменные характеристики изделиям, работающим под разными нагрузками. Такое решение упрощает сборку и снижает массу конструкции [4, 5].

Композиты, включающие такие компоненты, как углеродное волокно и эпоксидную смолу, характеризуются высокой прочностью и жесткостью при небольшом весе. Они используются для создания крыльев и фюзеляжей космических аппаратов [6].

Внедрение композитных материалов позволяет уменьшить массу конструкции, повысить прочность и жесткость изделий ракеты, а также повысить их теплостойкость. Так, вместо обычного дюралюмина плотностью 2640 кг/м^3 теперь используют боралюминиевые композиты, имеющие плотность 750 кг/м^3 и предел механической прочности 800 МПа. Это в два раза больше, чем у дюралюмина

[7, 8]. На рисунке ниже представлена обшивка головной части ракеты-носителя «Ангары-а5», выполненной из композитных материалов (рис. 2).



Рис. 2. Ракета носитель «Ангара-а5»

Космическая ракета включает в себя несколько отсеков, которые изолированы от других частей аппарата (рис. 3).

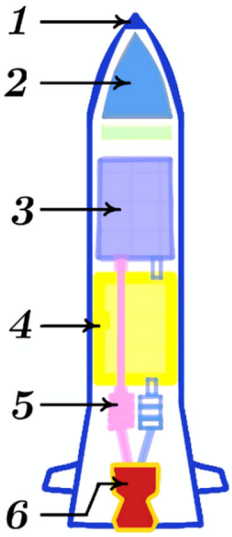


Рис. 3. Устройство ракеты: 1 – головная часть, 2 –приборный отсек, 3 – бак с топливом, 4 – окислитель, 5 – насосы, 6 –сопло

Реактивный двигатель – это устройство, создающее реактивную силу и состоящее из двух основных компонентов камеры сгорания и реактивного сопла.

Материалы, из которых изготавливают камеры сгорания, должны обладать следующими свойствами: высокая жаропрочность, высокое сопротивление усталости и трещинообразование при низкой скорости распространения трещин, хорошие характеристики теплопроводности и пластичности, а также высокая устойчивость к газовой коррозии. Корпусные детали камер сгорания изготавли-

вают из жаропрочных сталей, титановых сплавов и сплавов на никелевой основе [7].

Створки реактивных сопел сложной конфигурации, изготавливают из литейных сплавов, легированных такими металлами, как молибден и вольфрам, обладающими хорошей тугоплавкостью [9, 10]. Медные сплавы используются для изготовления стенок сопел ракетных двигателей у «Союзов», так как они обладают хорошей тугоплавкостью. Внутренняя стенка двигателя делается из меди, чтобы выдерживать высокую температуру, а внешняя стенка – из стали, чтобы держать механические нагрузки [11]. А серебро применяется в создании жидкостных реактивных двигателей, соединяя стальные и медные части камеры сгорания методом пайки в вакуумной печи [12]. В табл. 1 представлены характеристики материалов.

Таблица 1

Характеристики материалов

Материал	Плотность, г/см³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Удлинение при разрыве, %
Композиты	1,73–1,81	4 500–7 000	280–325	1,7–2,1
Дюралюминий	2,7–2,8	390–440	7,3–7,4	до 50
Серебро	10,491	245–250	82,7	50–59
Медные сплавы	8,92	200	110–130	60
Титановые сплавы (Ti-6Al-4V)	4,43	1 280	115	16
Керамика (Al_2O_3)	3,96	2 100	434	до 1

Но на смену меди приходят более технологичные и легкообрабатываемые материалы: графит, эрозионно-стойкие пластмассы, углепластик. Данные материалы обладают хорошей теплопроводностью и прочностью [5].

Также инженеры начали внедрять титановые сплавы. Они используются для производства газовых баллонов высокого давления за счет своей тугоплавкости, высокой прочности, легкости и устойчивости к коррозии. Титановые сплавы ВТ14, ВТ23 используются для создания оболочек, стержней, резьбовых соединений космических кораблей, а также баков для хранения топлива и сжатых газов [13, 14].

Для космических аппаратов важно, чтобы из применяемого материала не выделялся газ, так как в космосе он может попасть на чувствительные элементы космического аппарата: оптические элементы и электронные устройства [3]. Это может повредить работе космического аппарата. Для того, чтобы обеспечить отсутствие газа в материале, добиваются полной полимеризации, чтобы не было

свободных несвязанных молекул, и они не высвобождались в космосе, оседая на чувствительных элементах аппарата.

Корпус должен держать форму под нагрузками, выдерживать вибрации, которые присутствуют при запуске ракеты. Также он должен соответствовать требованиям по пожаростойкости и химической стойкости – чтобы химические вещества батарей в случае прокола не разрушили конструкцию [15, 16].

Керамика обладает высокой термостойкостью, малым коэффициентом расширения при нагреве и низкой плотностью. За счет этих свойств, такие керамические материалы, как карбид кремния и оксид алюминия, используются для создания теплозащитных покрытий и других элементов космических аппаратов [17, 18]. Термозащитные плитки космических ракет состоят из высококремнеземного и боросиликатного стекла. Углерод-карбидные материалы также используются в элементах двигательных установок и защитных экранах [19, 20]. Ниже представлены термозащитные плитки Бурана (рис. 4).



Рис. 4. Термозащитные плитки Бурана

Заключение

Все материалы, использующиеся в космических кораблях, выбираются для обеспечения прочности, легкости и устойчивости к вибрациям, коррозии, экстремальным температурам и радиации, что позволяет выводить аппараты на околоземную орбиту и успешно работать в условиях космоса. Все больше металлы и сплавы заменяют композитами, углеродными материалами, пластмассами, где это возможно. Уменьшение массы космических ракет позволяет увеличить массу полезного груза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куренков В.И., Сайгак В.М. Основные проектные параметры ракет-носителей: метод. указания к лабораторной работе. Самара: Самар. гос. аэрокос. ун-т. Самара, 1994. 12 с.

2. Ракетное уравнение Циолковского. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sas.com.ru/wp/ru/raketnoe-uravnenie-ciolkovskogo/ 10.05.25

3. Композиты для космоса: какими они должны быть и как их создают. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/smileexpo/articles/411337/ 11.05.25

4. Куренков В.И., Юмашев Л.П. Нагрузки, действующие на летательный аппарат: метод. указания к лабораторной работе. Куйбышев: Куйб. авиац. инст-т, 1985. 19 с.

5. Куренков В.И. Аэродинамика летательных аппаратов: метод. указания к лабораторной работе. Куйбышев: Куйб. авиац. инст-т, 1984. 16 с.

6. Куренков В.И. Внутренние усилия в элементах конструкций летательных аппаратов: метод. указания к лабораторной работе. Куйбышев: Куйб. авиац. инст-т, 1986. 16 с.

7. Мишин В.П., Карраск В.К. Основы конструирования ракет-носителей: учеб. для студентов втузов. М.: Машиностроение, 1991. 260 с.

8. Ракеты и композиты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https:// https://compositesinfo.ru/rakety-i-kompozity/ 12.05.25

9. Харитонов В. Ф., Соловьев П. В. Материалы деталей авиационных двигателей. учеб. пособие. Уфа : УГАТУ, 2021. – 80 с.

10. Материалы камер сгорания и выходных устройств. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://studfile.net/preview/2211714/page:14/ 09.05.25

11. Из какого металла делают спутники и/или ракеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/q/space/8332057601/ 12.05.25

12. Юмашев Л.П. Устройство ракет-носителей (сухие отсеки и топливные баки): учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. унт, 1995. 57 с.

13. Титановые сплавы. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://mazprom.ru/stati/titanovye-splavy/ 13.05.25

14. Волоцуев В. В., Ткаченко И.С. Введение в проектирование, конструирование и производство ракет: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2017. – 88 с.

15. Материалы, проверенные временем: из чего строят современные космические ракеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.techinsider.ru/technologies/6230-raketnye-metally-kak-zakalyalas-stal-i-drugie-metally/ 13.05.25

16. Овсянников В.Е., Шпитко Г.Н. Основы проектирования и конструирования машин: учеб. пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. 75 с.

17. Применение современной керамики в области износостойких материалов. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.techkingceramic.com/ru/news/applications-of-advanced-ceramics-in-the-field-of-wear-resistant-materials/ 14.05.25

18. Химическая и радиационная стойкость керамики. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=2148 14.05.25

19. Некоторые особенности покрытий для плиток многоразовой теплозащиты орбитальных космических кораблей. Статья. [Электронный ресурс]. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=641 15.05.25

20. Как уберечь космический корабль от превращения в пепел. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ferra.ru/review/techlife/heatshield.htm 15.05.25

© А. М. Бахтиярова, В. Р. Костылева, М. С. Исмаилова, Т. В. Ларина, 2025

УДК 681.7.02
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-14-20

А. М. Бахтиярова[1]✉, Е. Д. Моисеева[1], Д. В. Климова[1], Е. Г. Бобылева[1]

Сравнение технологического процесса получения линзы в единичном и серийном производствах

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: bakhtiyarova7207@gmail.com

Аннотация. На технологические процессы изготовления деталей в значительной степени влияет тип производства, определяющий годовой объем выпуска предметов труда определенной номенклатуры. Поэтому в зависимости от типа производства выбирают тот или иной технологический процесс изготовления оптических изделий. Линзы производят в единичном, серийном и массовом производстве для различных оптико-электронных приборов. Также на выбор технологического процесса влияет точность получаемых изделий, номинальные размеры, оборудование, имеющееся на заводе, и другие условия. Целью является сравнить два технологических процесса изготовления линзы, с учетом выбора оборудования и режимов обработки. В данной работе проанализированы типовые технологические процессы изготовления линз в единичном и серийном производствах, а также выявлены основные различия используемого оборудования и режимов обработки.

Ключевые слова: тип производства, технологический процесс, операция шлифования, полирование

A. M. Bakhtiyarova[1]✉, E. D. Moiseeva[1], D. V. Klimova[1], E. G. Bobyleva[1]

Comparison of the technological process of lens production in single and serial production

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: bakhtiyarova7207@gmail.com

Abstract. The technological processes of manufacturing parts are largely influenced by the type of production, which determines the annual output of labor items of a certain range. Therefore, depending on the type of production, one or another technological process for manufacturing optical products is chosen. Lenses are produced in single, serial and mass production for various optoelectronic devices. The choice of technological process is also influenced by the accuracy of the products obtained, nominal dimensions, equipment available at the factory, and other conditions. The aim is to compare the two lens manufacturing processes, taking into account the choice of equipment and processing modes. In this paper, the typical technological processes of lens manufacturing in single and serial production are analyzed, and the main differences between the equipment used and processing modes are identified.

Keywords: type of production, technological process, grinding operation, polishing

Введение

От типа производства оптических деталей зависит использование заготовок в виде прессовок или кусков стекла (блоков). Прессовки приближены по форме и размерам к готовой линзе, поэтому необходимости в разделительных опера-

циях нет. Чаще всего прессовки применяют в крупносерийном производстве. Заготовки в виде кратных кусков стекла или блоков используют при единичном и мелкосерийном производстве. Их делят с помощью таких операций, как распиливание, разрезание [1]. Далее заготовки поступают на операцию кругления, выполняемую на обдирочных и круглительных станках.

После заготовки шлифуют и полируют поштучно или на блоке по несколько штук. Часто это зависит от формы и размеров линз, реже от типа производства. Блокирование линз применяют для уменьшения времени и повышения точности обработки линз. Существует два способа блокирования линз на приспособлении: эластичный и жесткий [2, 3]. Ниже показаны блоки с наклеенными линзами в виде чашек и грибов (рис. 1).



Рис. 1 Блоки с наклеенными линзами

Прессовки блокируют жестко и шлифуют только первую исполнительную поверхность. В случае эластичного блокирования линз применяется последовательное двустороннее шлифование исполнительных поверхностей. Обработка осуществляется с использованием алмазного трубчатого инструмента, при этом заготовка фиксируется в цанговом патроне [3, 4].

Также одиночные линзы и блоки подвергают шлифованию на шлифовально-полировальных станках типа ШП, при этом количество переходов напрямую зависит от размеров самих деталей и блоков. На стадии мелкого шлифования используют абразивы М20 и М10 [5, 6].

После шлифования заготовки полируют с целью удаления матового слоя стекла на шлифовально-полировальных станках, при этом используется метод пробных проходов. Основной целью этапа полирования является обеспечение требований, предъявляемых к оптической детали на чертеже, таких как общая и местная ошибки, чистота поверхности [7].

Режимы обработки при полировании зависят от точности изделия. Линзы пониженной точности полируют на интенсивных режимах и инструментом с подложкой из сукна, фетра или войлока. Скорость полирования достигает 3 м/с, а удельное давление равно 2,5 Н/см^2. При обработке линз средней точности применяют полировальник со смоляной подложкой, работающий со скоростью 0,5-1 м/с и давлением 0,5-1 Н/см^2. Изделия высокой точности полируют с небольшой скоростью 0,2-0,3 м/с, давление при этом минимально и достигает 0,2-0,5 Н/см^2. При таких режимах высокоточные линзы полируют дольше для получения качественной поверхности [8, 9].

Скорость снятия припуска и формообразование заданной поверхности регулируется настраиванием станка и регулированием слоя смолы полировальника, путем ее подрезания. При этом такие показатели, как температура, вязкость смолы, а также способ подачи полированной суспензии должны поддерживаться в стабильном состоянии [10].

После полирования линзы поступают на заключительные операции центрирования и фасетирования.

Накопление погрешностей на предыдущих механических операциях линзы приводит к децентричности, которая указывается на чертеже детали. Чтобы избавиться от этих погрешностей, линзы центрируют. При центрировании совмещают оптическую и геометрическую оси линзы с осью вращения шпинделя станка [11, 12].

Точность центрирования линз зависит от способа их установки. Чаще всего используют три способа установки линзы: по блику, в самоцентрирующем патроне и по прибору [13, 14].

Метод установки линзы по блику применяют исключительно в единичном производстве, в случае, когда необходимо центрировать линзу с погрешностью 0,02-0,1 мм. Точность установки можно увеличить, используя автоколлимационную установку. Линзу закрепляют в шпинделе центрировочного станка на латунном патроне с использованием смолы. Далее добиваются совмещения оптической оси линзы с осью вращения шпинделя патрона, перемещая линзу по торцу патрона [15, 16].

Методом самоцентрирующих патронов линзы устанавливают на специальных центрировочных станках типа ЦС, используя в качестве инструмента алмазный шлифовальный круг [17, 18]. При зажиме линзы между левым и правым патронами, на нее действует сила, которая сдвигает линзу к оси шпинделя, тем самым ее центрируя. Точность изготовления кольцевых кромок патронов влияет на погрешность центрирования линз этим методом, которая достигает до 0,02 мм. Данный способ используется в массовом производстве, так как он весьма прост и производителен [19, 20].

Результаты

Технологический процесс получения линзы в единичном и мелкосерийном производствах, а также тип используемого оборудования и режимы обработки показаны в табл. 1.

Таблица 1

Операции получения линзы в единичном и мелкосерийном производствах

Операция			Тип оборудования	Режим обработки
Кратная заготовка	Штабик	Штучная заготовка	Алмазно-резцовые станки, вручную	Скорость 8-25 м/с при обработке вручную; 20-30 м/с при обработке на станке, подача 1 мм/с
1 Разделительная		–		
2 Кругление		–	Обдирочный станок, ручная обработка	Подача 1-3 м/мин
3 Грубое шлифование первой и второй поверхности			Станки ручные типа ШП, а также автоматные станки с алмазным инструментом	Скорость 15-25 м/с при давлении 10^6 Па, вручную при подаче 4-20 мм/мин
4 Сборка блока эластичным способом (если линза тонкая, то жестким способом)			Вручную или на наклеечном станке полуавтомате	Температура заготовки 60-80 °С, толщина смолы 2-5 мм
5 Тонкое шлифование первой поверхности			Станок ШП с водными суспензиями микропорошков электрокорунда или алмазный инструмент	Частота вращения шпинделя 1,3-60 об/с, скорость обработки 0,5-1 м/с
6 Полирование первой поверхности			Станок ШП с водной суспензией полирита	Скорость 0,2-5 м/с, давление полировальника до 1 г/см^2
7 Разборка блока			Специальный полуавтомат или УЗ-ванна с использованием щелочных растворов и ПАВ	В м/с производстве охлаждают до температуры -40 °С в специальной камере, в ед. производстве блок разбирают ударами
8 Сборка блока второй поверхности			Пункт 4	
9 Тонкое шлифование второй поверхности			Пункт 5	
10 Полирование второй поверхности			Пункт 6	
11 Разборка блока			Пункт 7	
12 Центрирование и фасетирование			Обе операции выполняют на специальном станке ЦС или центрировочном станке с установкой заготовок «по блику»	Частота вращения устанавливается в зависимости от диаметра линзы

В табл. 2 показан технологический процесс получения линзы в крупносерийном производстве.

Таблица 2

Операции получения линзы в крупносерийном производстве

Операция		Тип оборудования	Режим обработки
Кратная заготовка	1.1 Разделительная	Отрезные и фрезерные станки	Подача 30-50 мм/мин
	2.1 Кругление	Круглительные станки	Подача 1-3 м/мин, скорость 10-20 м/с
Штучная заготовка	1.2 Прессование из жидкой стекломассы	Механический, гидравлический, пневматический пресс	Нагревают до температуры вязкости стекла и прессуют под давлением
3 Сборка блока жестким способом		Автоматизированная линия по сборке, многошпиндельные прессы	Толщина смолы 0,1 мм
4 Грубое шлифование первой поверхности		Станки с алмазным инструментом типа «Алмаз», обдирочные станки	Скорость 20 м/с, подача 4-20 мм/мин
5 Тонкое шлифование первой поверхности		Станок ШП с вращением звена против часовой стрелки	Скорость 10-20 м/с
6 Полирование первой поверхности		Станки ШПД, ПД	Скорость 0,2-3 м/с
7 Разборка блока		Нагревательная камера, УЗ-полуавтоматическая установка УЗР-2	Нагревание блока до температуры размягчения смолы, или использование УЗ-колебаний
8 Сборка блока второй поверхности		Пункт 3	
9 Грубое шлифование второй поверхности		Пункт 4	
10 Тонкое шлифование второй поверхности		Пункт 5	
11 Полирование второй поверхности		Пункт 6	
12 Разборка блока		Пункт 7	
13 Центрирование и фасетирование		Центрировочные станки полуавтоматы типа ЦС	Подача ручная или автоматическая до 0,002 м/с; толщина алмазоносного слоя 1-2 мм

Заключение

В табл. 3 приведен сравнительный анализ двух технологических процессов, с указанием основных различий в оборудовании мелкосерийного и крупносерийного производств.

Таблица 3

Основные различия в операциях получения линз

Вид операций	Единичное и мелкосерийное производство	Крупносерийное производство
Разделительная	Производится на алмазно-резцовых станках	Производится на отрезных и фрезерных станках
Кругление	Производится на обдирочных станках, либо с помощью ручной обработки	Производится на круглильных станках
Прессование из жидкой стекломассы	Не применяется	С помощью механического, гидравлического, пневматического пресса
Сборка блока	Эластичный метод, вручную или на наклеечном станке полуавтомате	Жесткий метод, на многошпиндельных прессах и автоматизированных линиях по сборке
Грубое шлифование	Производится до сборки блока, на ручных станках	После сборки блока, на станках типа «Алмаз»
Тонкое шлифование	Незначительные различия	
Полирование	Незначительные различия	
Разборка блока	На специальных полуавтоматах или УЗ-ваннах	В нагревательных камерах, УЗ-установках
Центрирование и фасетирование	Незначительные различия	

В целом, типовой технологический процесс изготовления линзы в единичном и серийном производствах очень схожи. При этом важно учитывать размер выпускаемой партии, номинальные размеры получаемых деталей, их точность, а также правильно выбирать оборудование и режимы обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель. – Москва : Машиностроение, 1985. – 368 с. – Текст : непосредственный.

2. Малов, А. Н. Обработка деталей оптических приборов / А. Н. Малов, В. П. Законников. – Москва : Машиностроение, 2006. – 304 с. – Текст : непосредственный.

3. Михнев, Р. А. Оборудование оптических цехов / Р. А. Михнев, С. К. Штандель. – Москва : Машиностроение, 1981. – 368 с. – Текст : электронный // http://5fan.ru : [сайт]. – URL : http://5fan.ru/wievjob.php?id=42278. – Режим доступа: свободный.

4. Справочник технолога-оптика : к изучению дисциплины / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгожин ; ред. М.А. Окатов. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2004. – 679 с. – Текст : непосредственный.

5. Ефремов, А. А. Изготовление и контроль оптических деталей : учеб. пособие для ср. проф.-тех. училищ / А. А. Ефремов, Ю. В. Сальников. – Москва : Высшая школа, 1983. – 255 с. – Текст : электронный // https://booksee.org : [сайт]. – URL : https://booksee.org/book/327524. – Режим доступа: свободный.

6. Козерук, А. С. Исследование влияния наладочных параметров станка на производительность и качество процесса одновременной двусторонней обработки линз / Д. Л. Мальпика, А. А. Сухоцкий, М. И. Филонова: Наука и техника. 2018.

7. Оптические технологии и материалы. Центрирование линз : методические указания для обучающихся по направлениям подготовки 12.03.01 Приборостроение, 12.03.02 Оптотехника (уровень бакалавриата) / Е. Г. Бобылева, И. В. Парко ; СГУГиТ. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – 20 с. – Текст : непосредственный.

8. Технология оптических деталей / Под ред. М. Н. Семибратова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 283 с. – Текст : непосредственный.

9. Ардамацкий, А. Л. Алмазная обработка оптических деталей / А. Л. Ардамацкий. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 232 с. – Текст : непосредственный.

10. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х частях / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва : Машиностроение, 2001. – Текст : непосредственный.

11. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. – Москва : Высшая школа, 1975. – 316 с. – Текст : непосредственный.

12. Технология оптических деталей / Под ред. М. Н. Семибратова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 283 с. – Текст : непосредственный.

1 3. Технология оптических деталей. Расчет заготовок оптических деталей : сб. описаний практ. работ / Е. Г. Бобылева, Е. Ю. Кутенкова ; СГУГиТ. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 67, [1] с. – ISBN 978-5-906948-04-5 – Текст : непосредственный.

14. Алмазный инструмент для обработки оптических деталей /В. М. Альтшуллер, С. А. Герасимов, М. В. Грималюк // Оптический журнал. – 2011. – Вып. 4 (78). – С. 25-32.

15. Технология обработки оптических деталей / Под ред. М.Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1975. — 208 с. – Текст : непосредственный.

16. Оптические технологии и материалы. Расчет алмазно-абразивного инструмента : практикум / Е. Г. Бобылева ; СГУГиТ. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 33 с. – ISBN 978-5-907513-83-9. – Текст : электронный. – URL: http://lib.sgugit.ru. – Режим доступа: для авториз. пользователей.

17. Оптические технологии и материалы. Расчет инструментов : практикум для обучающихся по направлениям подготовки 12.03.01 Приборостроение, 12.03.02 Оптотехника / Е. Г. Бобылева ; СГУГиТ. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – 21 с. – Текст : электронный. – URL: http://lib.sgugit.ru. – Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Оптический журнал. – Санкт-Петербург. – Выходит 12 раз в год. – ISSN1023-5086. – Текст : непосредственный.

19. Технология оптических деталей. Расчет заготовок оптических деталей : сб. описаний практ. работ / Е. Г. Бобылева, Е. Ю. Кутенкова ; СГУГиТ. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 67, [1] с. – Текст : электронный. – URL: http://lib.sgugit.ru. – Режим доступа: для авториз. пользователей.

20. Козерук, А. С. Технология производства оптических деталей : учебно-методическое пособие / А. С. Козерук, В. О. Кузнечик ; – Минск : БНТУ, 2023. – 100 с.

© А. М. Бахтиярова, Е. Д. Моисеева, Д. В. Климова, Е. Г. Бобылева, 2025

УДК 620.2
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-21-24

С. М. Данилов[1]✉, Е. Г. Бобылева[1], И. В. Парко[1],

Технология «умного» окна

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: danilovsergei2005@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются история создания, технологии изготовления «умного» окна. Была рассмотрена история появления «умного» окна, а именно то, как идея Стива Адаби переросла в компанию Innovative Glass Corporation. Были изучены различные технологии производства «умных» окон. Объектом изучения стали технологии изготовления «умных» стекол, таких как: Полимерные жидкокристаллические устройства (LCD), устройства со взвешенными частицами (SPD), электрохромные устройства (ECD). «Умное» окно состоит из двух прозрачных стекол и двухслойной пленки, содержащей жидкие кристаллы, между ними. Уникальной функцией «умного» окна является его способность затемняться или же мутнеть, благодаря чему сокращается энергопотребление за счет уменьшения теплообмена с окружающей средой. Достоинства «умных» стекол заключается в возможности самоочищения и пуле непробиваемости. Зона применения данных технологий обширна: от офисов до медицинских учреждений.

Ключевые слова: «умное» стекло, технология, достоинства

S. M. Danilov[1]✉, E. G. Bobyleva[1], I. V. Parko[1],

Smart-Window technology

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,Russian Federation
e-mail: danilovsergei2005@mail.ru

Abstract. The article discusses the history of the creation and manufacturing technology of a smart window. The article examined the history of the appearance of a "smart" window, namely, how the idea of Steve Adabi grew into the Innovative Glass Corporation. Various technologies for the production of "smart" windows have been studied. The object of study is the technology of manufacturing "smart" glasses, such as Polymer liquid crystal devices (LCD), Devices with suspended particles (SPD), Electrochromic devices (ECD). A smart window consists of two transparent panes and a two-layer film containing liquid crystals between them. A unique feature of a smart window is its ability to darken or darken, which reduces energy consumption by reducing heat exchange with the environment. The advantages of smart glasses are the ability to self-clean and bullet proof. The area of application of these technologies is extensive: from offices to medical institutions.

Keywords: "smart" glass, technology, dignities

Введение

«Умное» окно – это изделие, состоящее из двух прозрачных стекол и двухслойной пленки, содержащей кристаллы, между ними, способное затемняться, мутнеть, менять свой цвет в зависимости от его состава. Уникальным свойством

«умного» окна является его основное свойство – затемнение, что благоприятно влияет на снижение энергопотребления за счет уменьшения теплообмена.

Инженер Стив Абади в 1979 году решил создать окно, которое сможет затемняться по желанию человека, что в то время считалось невозможным. Только в 1984 году инженер смог воплотить в жизнь свою задумку, а в 2003 году открыть собственную компанию Innovative Glass Corporation по производству «умных» окон [1–8].

Основной отличительной характеристикой умного окна является его многослойная структура:

1. Первый и второй слой – прозрачное стекло, обеспечивающее защиту и визуальную ясность.

2. Двухслойная пленка, содержащая жидкие кристаллы, изменяющие свои оптические свойства при воздействии электрического тока, расположенная между двумя слоями прозрачного стекла.

Виды технологий изготовления «умного» стекла

«Умное» стекло можно изготовить, используя три метода: полимерные жидкокристаллические устройства, устройства со взвешенными частицами, электрохромные устройства.

Первый метод изготовления «умного» стекла включает в себя принцип, который основан на свойстве полимерных жидкокристаллических устройств разлагать на составляющие жидкие кристаллы, а затем затвердевать. В момент затвердевания кристаллы создают на полимере вкрапления [9–15].

При поступлении напряжения электромагнитное поле заставляет кристаллы упорядоченно выстраиваться. При низком напряжении стекло сохраняет частичную прозрачность, а при увеличении напряжения его прозрачность значительно возрастает (рис. 1).

Второй метод включает в себя устройство со взвешенными частицами. Между двумя пленками находится жидкость со стержнеобразными взвешенными частицами. Частицы без электрического напряжения находятся в хаотичном состоянии и поглощают свет, и поэтому стекло имеет серый, черный или темно-синий цвет.

Третий метод. Электрохромные устройства с напылением ионов лития. Подача напряжения регулирует прозрачность «умного» стекла, благодаря этому состояние материала меняется между прозрачным, полупрозрачным и цветным.

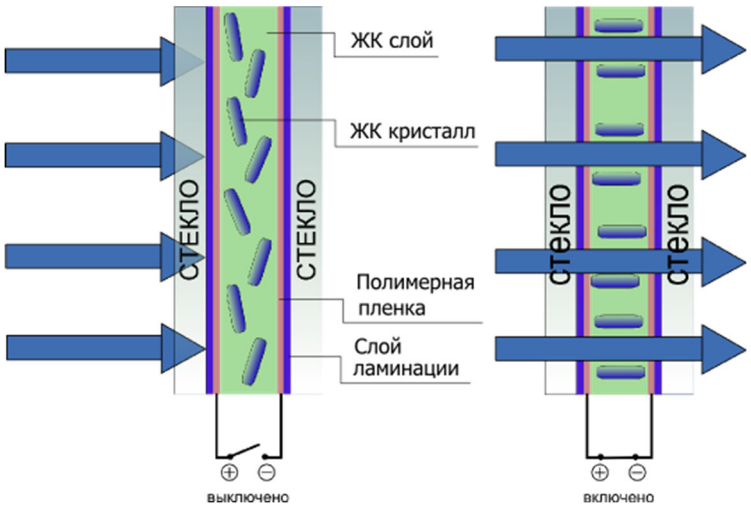


Рис. 1 Зависимость степени прозрачности «умного» стекла от напряжения

Достоинства «умного» стекла

Технология самоочищающихся окон, основана на нанесении на уличную сторону стекол специального покрытия. Диоксид титана наносят на поверхность при температуре в +600°С, объединяя фотокаталитический слой с покрытием. Это делает защитную пленку устойчивой к воздействию внешней среды и увеличивает срок её службы на десятки лет.

Существует технология Vario Plus Sky, которая предполагает многослойную структуру стекла и повышенную прочность. Такое стекло выдерживает давление 800 Дж, когда обычное стекло разбивается при 200 Дж.

Умное стекло не разлетится на мелкие кусочки, даже если его разбить. Это связано с тем, что стекло подвергается закаливанию и покрывается специальной плёнкой, которая не даёт ему образовывать острых осколков. В результате стекло останется висеть в треснутом состоянии [16–22].

Заключение

Можно сделать вывод, что «умное» окно – это полезное изобретение, которое позволяет его использовать в архитектуре, строительстве, в банковской сфере и других отраслях народного хозяйства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Д. А. Умное стекло в архитектуре и дизайне: технологические особенности, применение и влияние на устойчивое развитие //Современное строительство и архитектура. – 2024. – №. 12 (55). – Текст: непосредственный.

2. Ходюк Н. А. Материаловедение и материалы дизайна. Стекло // Инновационные материалы и технологии в дизайне. – 2021. – С. 65-67. – Текст: непосредственный.

3. Никоноров Н.В. Оптическое материаловедение: основы прочности оптического стекла // Учебное пособие, курс лекций. — СПб: СПбГУ ИТМО. — 2009. — С. 102. – Текст: непосредственный.

4. Чудинов Д.М. Разработка новых интеллектуальных светопрозрачных ограждающих конструкций зданий // Инженерные системы и сооружения. — 2010 — № 1. — С. 93-97. – Текст: непосредственный.

5. Саяпина Д.Г. «Умное» стекло в современном доме // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции – ФАД ТОГУ. – 2013. – Т. 2. – С. 145-151. – Текст: непосредственный.

6. Каратаев Л.П. Совершенствование светопрозрачных конструкций // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 2. – С. 45-50. – Текст: непосредственный.

7. Магай А. А. Инновационные технологии в остеклении фасадов высотных зданий // Энергосовет. – 2012. - №4(23) с. 48–52. – Текст: непосредственный.

8. Отческих, К. А. «Умное стекло» в современной архитектуре // Молодой ученый. — 2013. — № 4 (51). — С. 86-88. – Текст: непосредственный.

9. Айрапетов Г. А. Строительные материалы: учебно-справочное пособие. – М: Изд-во Феникс, 2009. — 699 с. – Текст: непосредственный.

10. Донцова А.Е. Стекло с управляемой прозрачностью (smart window) в гражданском строительстве // Alfabuild. — 2018. — № 4 (6). — С. 74–82. – Текст: непосредственный.

11. Чудинов Д.М., Сотникова К.Н., Щербаков К.С., Черноухова Ю.А. Разработка новых интеллектуальных светопрозрачных ограждающих конструкций зданий // Инженерные системы и сооружения. 2010. №1. С. 93–97. – Текст: непосредственный.

12. Каратаев Л.П. Совершенствование светопрозрачных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2011. №2. С. 45–50. – Текст: непосредственный.

13. Закируллин Р.С. Селективное регулирование светопропускания стекла и стеклянных конструкций // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. №6(125). С. 172–180. – Текст: непосредственный.

14. Садакова В.В, Земцов М.И. Обзор технологий художественной обработки стекла // Наука в центральной России. 2013. № 4. С. 28–32. – Текст: непосредственный.

15. Плотников А.А. Архитектурно-конструктивные принципы и инновации в строительстве стеклянных зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 11. С. 7–15. – Текст: непосредственный.

16. Дербина С.Н., Борискина П.В., Плотников А.А. Эволюция конструктивных решений светопрозрачных фасадов // Вестник МГСУ. 2011. №22. С. 26. – Текст: непосредственный.

17. Спиридонов А.В. Светопрозрачные конструкции в россии: вчера и сегодня // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века 2015. № 1(192). С. 46–51. – Текст: непосредственный.

18. Лезарева Е.А. Тышлантян Ю.С. Разработка декоративных стекол с применением Флотационных хвостов углеобогащения // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. №8(163). С. 42–43. – Текст: непосредственный.

19. Синявская Д. В. Материалы, используемые для сплошного остекления фасадов // Наука, образование: и экспериментальное проектирование. 2014. С. 419–420. – Текст: непосредственный.

20. Ма Линьфу. Исторический аспект и характеристики использования систем умного стекла. – Текст: электронный // АПНИ: [сайт] – URL: https://apni.ru/article/5754-istoricheskij-aspekt-i-kharakteristiki (дата обращения: 05.05.2025). – Режим доступа : свободный.

21. Стекло с изменяемой прозрачностью – что это? // Петроокна: [сайт] – URL: https://petrookna.ru/blog/steklo-izmenyaemoi-prozrachnostyu (дата обращения: 05.05.2025). – Режим доступа : свободный.

22. Технологии самоочищающихся стекол: что это и как работает. // Пластика окон: [сайт] – URL: https://www.plastika-okon.ru/about/articles /sovremennyye-tekhnologii-samoochischayuschikhsya-stekol/?ysclid=mamrtd3ud063 450909 (дата обращения: 05.05.2025). – Режим доступа : свободный.

© С. М. Данилов, Е. Г. Бобылева, И. В. Парко, 2025

УДК 528.7
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-25-31

В. Р. Костылева[1]✉, А. М. Бахтиярова[1], М. С. Исмаилова[1], И. В. Парко[1]

Раскрывая тайны Вселенной: астрофотография для обнаружения и изучения космических объектов

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлены основные направления астрофотографии. Рассмотрены несколько направлений астрофотографии, пейзажи, съемка удаленных объектов космоса и планетарная съемка. Изучены различные телескопы с разными оптическими системами, монтировки и цифровые камеры и аксессуары к телескопам, указаны различные программы для обработки снимков. Проведен сравнительный анализ используемого оборудования, с помощью которого можно получить снимки удаленных объектов космоса. Представлены результаты практических наблюдений и съемки летнего и зимнего неба, с помощью цифровой камеры модели Canon EOS 650D и обычного телефона Vivo V30, исследования проводились при хорошей погоде. В таблице указаны, характеристики между телефоном Vivo V30 и астрономического телескопа ТАЛ 75, основными параметрами являются увеличения и фокусное расстояние.

Ключевые слова: астрофотография, телескоп, небесные объекты, астеризм

V. R. Kostyleva[1]✉, A. M. Bakhtiyarova[1], M. S. Ismailova[1], I. V. Parko[1]

Revealing the secrets of the Universe: astrophotography for the detection and study of space objects

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Abstract. This article presents the main directions of astrophotography. Several areas of astrophotography, landscapes, shooting of remote space objects and planetary photography are considered. Various telescopes with different optical systems, mounts and digital cameras and accessories for telescopes have been studied, and various image processing programs have been specified. A comparative analysis of the equipment used, which can be used to obtain images of remote space objects, has been carried out. The results of practical observations and shooting of the summer and winter sky using a Canon EOS 650D digital camera and a regular Vivo V30 phone are presented, the research was carried out in good weather. The table shows the characteristics between the Vivo V30 phone and the TAL 75 astronomical telescope. The main parameters are magnification and focal length.

Keywords: astrophotography, telescope, celestial objects, asterism

Введение

Астрофотография – вид фотографии, предметом съемки которой является ночное небо, объекты Солнечной системы и глубокого Космоса. Цели астрофотографии могут быть разными, например, снимки используются для изучения процессов и явлений, открытие новых звезд, в искусстве [1].

Астрофотографию можно разделить на несколько направлений: пейзажи, съемка Солнца, объектов глубокого Космоса.

Пейзаж – съемка ночного неба в сочетании с земным ландшафтом. Это самый распространенный вид астрофотографии, который подходит для начинающих. Часто в кадре можно увидеть Млечный Путь, звездные скопления или метеорные потоки.

Съемка Солнца, Луны и планет – фокусируется на объектах Солнечной системы. Для такой съемки требуется телескоп и камера с высокой чувствительностью [2].

Объекты глубокого Космоса – это самый сложный вид астрофотографии, требующий профессионального оборудования. Съемка объектов глубокого Космоса позволяет запечатлеть туманности, галактики и звездные скопления, находящиеся на расстоянии миллионов световых лет.

Перейдем к выбору оборудования для астрофотографии. Основными элементами телескопа, является монтировка, сама оптическая труба, камера для регистрации изображения.

Телескоп – это оптический прибор, состоящий из системы линз, он идеально подходит для наблюдения планет и спутников.

Телескопы Шмидта-Кассегрена, является катодиоптрическим, зеркально-линзовыми системами. Эти телескопы занимают немного места, также они исправляют сферические аберрации, но у них сложная конструкция и есть большая потеря света.

Рефлекторы имеют большую апертуру, что позволяет получать яркие изображения объектов дальнего космоса, в том числе туманностей и галактик. Однако они требуют более регулярной юстировки [3].

– Монтировка – это несущая часть прибора.

Экваториальная монтировка телескопа необходима для компенсации вращения Земли при длительных выдержках.

Азимутальная монтировка телескопа, по сравнению с другими видами монтировки, проста в использовании, но требует дополнительных устройств (например, искатель) для астрофотографии [3, 4].

– Камера для фиксации изображения.

Цифровые зеркальные камеры (DSLR) – устройства, которые могут снимать объекты при слабом освещении, как правило с автофокусировкой.

Астрономические камеры (CCD, CMOS) – специальные приборы с повышенной чувствительностью и низким уровнем шума, предназначенные для астрофотографии.

Монохромные камеры в сочетании с фильтрами позволяют получать изображения с различными эффектами [5].

Веб-камеры могут использовать для съемки Луны и планет методом удачных экспозиций.

– Аксессуары к телескопам – это светофильтры, линзы Барлоу, видоискатели.

Светофильтры используют для уменьшения светового загрязнения, узкополосные фильтры для съемки туманностей, планетарные фильтры для повышения контраста деталей.

Барлоу-линзы увеличивают фокусное расстояние объектива телескопа, что полезно для съемки планет [6, 7].

Видоискатели применяют достаточно часто в телескопах модели (ТАЛ) они необходимы для точного наведения трубы на исследуемый объект. На рисунке 1 представлен летне-осенний треугольник, сфотографирован на телефон Vivo V30.

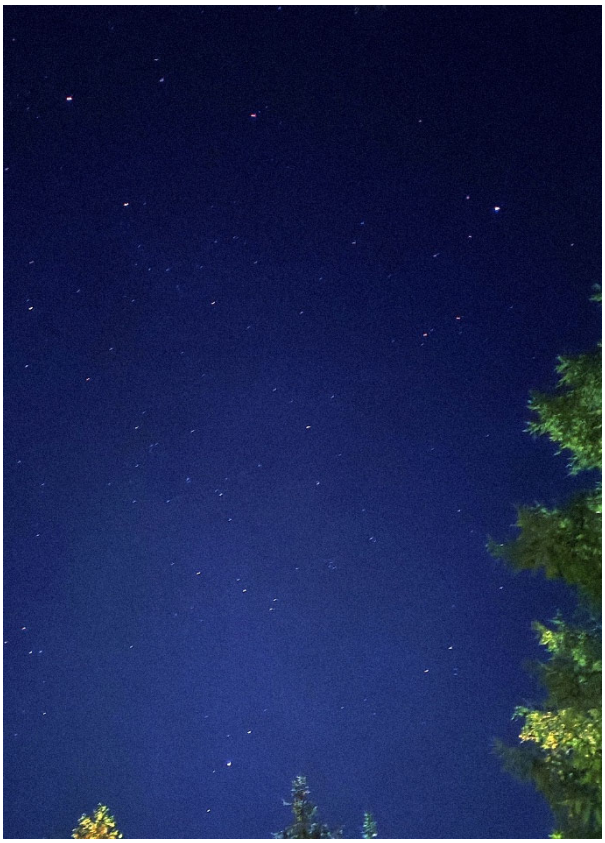


Рис.1. Летне-осенний треугольник, сфотографирован на телефон Vivo V30

Обработка снимка является неотъемлемой частью астрофотографии и включает в себя:

– сложение нескольких кадров для увеличения отношения сигнал/шум;

– обработку резкости, контрастности, цветокоррекции.

Существуют различные программы для обработки, такие как DeepSkyStacker, PixInsight, Adobe Photoshop, GIMP, Photo Editor [8, 9].

На рисунке 2 представлена фотография летнего неба, из оборудования, мы использовали зеркальный фотоаппарат Canon EOS 650D с выдержкой 4 секунды и открытой диафрагмой f/3,5.



Рис.2. Астрофотография, сделанная с помощью зеркального фотоаппарата Canon EOS 650D

В Новосибирске, можно наблюдать разные созвездия в зависимости от времени года. Летом можно увидеть созвездия Лебедя, Лиры и Орла, они считаются астеризмом и представляют собой летне-осенний треугольник. Даже при городской засветке фонарей его хорошо видно. Снимок Луны указан ниже (рис. 3).



Рис.3. Снимок Луны сделан с помощью телескопа ТАЛ-75 и телефона

Зимой самое заметное созвездие – Орион, с помощью него можно найти звезду Сириус, которая находится в созвездии Большого пса и Процион – созвездие Малого пса [10, 11].

Телескоп астрономический любительской модели (ТАЛ) выпускают на приборостроительном заводе [12].

Поскольку телефон имеет свои недостатки, можно увидеть на снимке сферические аберрации. Снимок зимнего треугольника, сделанного с помощью телефона Vivo V30 показан ниже (рис. 4).



Рис. 4. Снимок Зимнего треугольника,
сделанный с помощью телефона Vivo V30

Фотография зимнего треугольника, выполненная на телефон модели Vivo V30 пришлось обработать несколько раз с помощью программы «Photo Editor», чтобы осветлить небо и сделать звезды более яркими, то есть повысить контраст: фон – объект. Ниже представлен снимок Солнца с облаками, сделанный с помощью телескопа ТАЛ-75 и телефона (рис. 5).



Рис.5. Снимок Солнца с облаками, сделанный
с помощью телескопа ТАЛ-75 и телефона

Таблица 1

Конструктивные параметры телефона Viv0 V30 и телескопа ТАЛ-75

Характеристика	Телескоп ТАЛ-75	Телефон Vivo V30
Возможности увеличения	150 крат	20 крат
Фокусное расстояние	600 мм	23 мм
Оптика	Рефрактор (линзовый телескоп)	Комплекс камер: Основная (широкоугольная), сверхширокоугольная, макрокамера
Шумы	При больших увеличениях	дневные кадры на Vivo V30 хорошо детализированы и не содержат шумов
Возможности	Съемка луны, планет, галактик, туманностей	Съемка Луны и ярких планет
Аксессуары	Широкий спектр	Ограничены
Простота использования	Требует определенных знаний и навыков	Высокая
Матрица/Сенсор	Отсутствует встроенная матрица/сенсор. Изображение формируется оптической системой и предназначено для визуального наблюдения или регистрации с помощью сторонних устройств	Матрица – AMOLED, разрешение 1260×2800 пикселей, диагональ экрана – 6,78 дюйма
Дополнительное оборудование	Монтировка (экваториальная или азимутальная), окуляры с разным фокусным расстоянием, фильтры, камера	Штатив с регулировкой высоты, внешние аккумуляторы (Power Bank)

Исходя из личного опыта можем сказать, что телефон подходит для съемки простых астрономических объектов, таких как Луна и Венера, Марс, Юпитер. Однако, из-за ограниченного размера диаметра объектива и чувствительной площадки сенсора, качество изображений значительно уступает телескопам [13, 14].

Телескоп собирает больше света и получает детальные изображения предмета за счет больших апертуры и фокусного расстояния, а также оснащения фильтрами, которые позволяют улучшить качество съемки [15, 16].

Заключение

Любительская астрофотография – это популярное хобби, которое позволяет узнать что-то новое о космических объектах и создавать собственные потрясающие изображения. Выбор оборудования, освоение методов съемки и обработки требуют времени и усилий, но результат стоит того.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Первое изображение неба — история астрофотографии и технологии ее создания. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/558262/ 28.04.25

2. Ж. Вокулер, Ж. Тексеро. Фотографирование небесных тел. – Москва: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 114 с.

3. Техника съёмки ночного неба и объектов космоса . Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://macroart.ru/macrolink-12810 01.05.25

4. Астрофотография: секреты съемки звездного неба и объектов глубокого космоса. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://astrovert.ru/journal/astrofoto/astrofotografiya-sekrety-semki-zvezdnogo-neba-i-obektov-glubokogo-kosmosa/ 02.05.25

5. Как выбрать телескоп. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://fotoskala.ru/articles/telescope/ 11.05.25

6. Раскрыть красоту звезд: выбираем телескоп. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://tech.onliner.by/2015/09/14/vybiraem-teleskop 02.05.25

7. Зеркально-линзовый телескоп (катадиоптрик). Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://binoculars-telescopes.com/ru/telescopy/zerkalno-linzovy/ 03.05.25

8. Как выбрать телескоп, чтобы разглядеть все, что хочется. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://lifehacker.ru/kak-vybrat-teleskop/ 03.05.25

9. В. М. Балебанов, Адаптивный телескоп, 1984. Патент SU 1 205 101 A1. [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1205101A1_19860115 04.05.25

10. Как наблюдать Луну и планеты. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/494606/ 05.05.25

11. Основы наблюдения: Как вы можете делать четкие снимки планет. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.8154ea6e-680628ee-7035aac6-74722d776562/https/www.astronomy.com/observing/observing-basics-try-your-luck/ 06.05.25

12. Основы цифровой астрофотографии. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://deepsky-world.ru/astrophoto/pixinsight/osnovy-tsifrovoy-astrofotografii 07.05.25

13. Что такое калибровочные кадры (дарки/биасы/флеты). Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://dsastro.ru/2019/02/04/dark-bias-flat/ 07.05.25

14. Любительская астрономия для начинающих. Статья. [Электронный ресурс]. URL: http://skygazer.ru/letnee-zvezdnoe-nebo/ 08.05.25

15. Canon EOS 650D Технические характеристики. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://www.canon.ru/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_650d/specifications/ 13.05.25

16. Климат Новосибирска и его изменения. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://novosibirsk-pogoda.ru/klimat-novosibirska-i-ego-izmeneniya 09.05.25

17. Новосибирский приборостроительный завод (НПЗ). Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://npzoptics.ru/ 10.05.25

18. Запечатлейте космос с помощью своего телефона. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://trlated.tubopages.org/proxy_u/enru.ru.334298f968062b9cc53e7ff574722d776562/https/www.astronomy.com/observing/capture-the-cosmos-with-your-smartphone/ 10.05.25

19. Vivo V30. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.vivo.com/ru/products/param/v30 10.05.25

20. Телескоп НПЗ ТАЛ 75R. Паспорт. [Электронный ресурс]. URL: https://npzoptics.ru/files/ТАЛ-75R.pdf?ysclid=ma1ak6bgw9721971655 12.05.25

© В. Р. Костылева, М. С. Исмаилова, А. М. Бахтиярова, И. В. Парко, 2025

УДК 629.78
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-32-38

В. Р. Костылева[1]✉, А. М. Бахтиярова[1], М. С. Исмаилова[1], И. В. Парко[1]

Новая эра Российского космостроения: перспективы в разработке космического флота

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена основным этапам развития российского космического флота, включая текущие проекты и перспективные разработки. Особое внимание уделено проекту Российской орбитальной станции (РОС), в реализации которого задействованы 19 ведущих предприятий ракетно-космической отрасли. В период с 2027 по 2029 годы запланирован вывод на орбиту научно-энергетического модуля (НЭМ), универсального узлового модуля (УУМ), шлюзового модуля и базового модуля. Планируется запустить 15 ракет «Ангара-А5М» и 19 ракет «Союз-2.1б». «Ангара-А5» обладает мощной грузоподъёмностью и должна заменить устаревшие ракеты «Протон-М». Проведен сравнительный анализ между двумя космическими флотами «Орел» и «Союз». Рассмотрена подготовка кадров для космической отрасли, а также образовательные программы и развитие международного сотрудничества в области космического образования. Ведется разработка космических аппаратов для дистанционных и контактных исследований Луны.

Ключевые слова: космический корабль Орел, космический телескоп Спектр-УФ, образовательные программы, космическая станция

V. R. Kostyleva [1]✉, A. M. Bakhtiyarova[1], M. S. Ismailova[1], I. V. Parko[1]

A new era of Russian space construction: prospects for the development of the space fleet

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Abstract. The article is devoted to the main stages of the development of the Russian space fleet, including current projects and promising developments. Special attention is paid to the Russian Orbital Station (ROS) project, which involves 19 leading enterprises of the rocket and space industry. In the period from 2027 to 2029, it is planned to launch into orbit the scientific and energy module (NEM), the universal node module (UUM), the gateway module and the base module. It is planned to launch 15 Angara-A5M missiles and 19 Soyuz-2.1b missiles. The Angara-A5 has a powerful payload capacity and should replace the outdated Proton-M missiles. A comparative analysis was carried out between the two space fleets "Eagle" and "Soyuz". The article considers personnel training for the space industry, as well as educational programs and the development of international cooperation in the field of space education. Spacecraft are being developed for remote and contact lunar exploration.

Keywords: Orel spacecraft, Spektr-UV space telescope, educational program, space station

Введение

В настоящее время Российское космостроение включает в себя: пилотируемые корабли, станции, спутники связи. Особое внимание уделяется разработке новых космических кораблей, способных обеспечить безопасность и глубокое изучение космоса.

Проект Российской орбитальной станции (РОС) утвержен Роскосмосом. В разработке участвуют 19 корпораций. С 2027 по 2029 год планируется старт узлового, шлюзового, научно-энергетического и базового модулей. К платформе присоединят еще два дополнительных модуля в 2032 году. Для обслуживания будет создан специальный пилотируемый транспортный корабль [1, 2].

Станция будет функционировать на орбите с наклоном 96,8 градуса, что даст ей возможность пролетать над всей территорией России и полярными регионами планеты, чего не может обеспечить МКС [3, 4].

Для орбитальной станции планируется создание пилотируемого транспортного корабля (ПТК). В программу испытаний внесут: сброс макетов с вертолета; тестирование аварийного спасения как в начале, так и в воздухе; испытания с беспилотными и управляемыми полетами [5].

Грузовые суда «Прогресс РОС» будут транспортировать важные компоненты на станцию. С 2027 по 2033 год запланировано провести 15 запусков ракет «Ангара-А5М» и 19 запусков «Союз-2.1б».

РОС станет основой для создания специальных веществ, сборки крупных механизмов, разработки препаратов. Дополнительно станцию используют для проведения космических изысканий Земли и Солнечной системы [6].

Станция будет обладать техническими возможностями, что позволит проводить астрономические и физические наблюдения, изучать изменения климата и конструировать устройства для дальних космических миссий. Ниже представлен снимок ракеты Ангары-А5 (рис. 1).



Рис. 1. Ракета Ангара-А5

В январе 2024 года на космодром Восточный доставлен первый тяжелый космический флот «Ангара-А5». Этот экологический прибор вытеснит устаревшие корабли «Протон-М» [7].

«Орел» представляет собой многоразовый пилотируемый транспортный космический корабль, разрабатываемый в ракетно-космической корпорации (РКК) «Энергия» (рис. 2). Корабль способен перевозить от 4 до 6 человек. В независимом режиме он может находиться в космосе до 30 суток, а в составе орбитальной станции – до 1 года. Если на борту «Орла» будет 6 космонавтов, то они смогут взять с собой до 500 кг груза. При меньшем количестве экипажа грузоподъемность можно увеличить [8, 9].



Рис. 2. Космический корабль «Орел»

Диаметр нового космического флота достигнет 4,4 метра, что вдвое превышает диаметр устройства «Союз ТМА». Форма аппарата выбрана для улучшения маневренности при посадке на российские полигоны. Навигационное обеспечение корабля «Орел» будет осуществляться с помощью новой системы управления движением, которая объединяет приемники ГЛОНАСС с высокоточными гироскопическими и оптическими датчиками [9, 10].

Корабль сделают экологичным, так как его будут применять многократно. Они станут работать на твердотопливных двигателях с тягой 22,5 тс и однокомпонентных двигателях на перекиси водорода с тягой 75 кгс [11].

Для посадки космической ракеты будет применена парашютно-реактивная система. На высоте около 1 километра твердотопливные ракетные двигатели начнут снижать скорость спуска. Затем корабль мягко опустится на амортизированные опоры, что предотвратит его опрокидывание при касании Земли.

Вертикальная реактивная посадка способствует увеличению срока эксплуатации – прибор будут применять до 10 раз, то есть он становится многоразовым. «Орел» способен приземлиться и в океане, при этом экипаж корабля сможет оставаться внутри и ждать спасателей в течении двух дней [10, 12].

Новый космический аппарат превзойдет корабли серии «Союз» по ряду параметров, показанных в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры космических кораблей «Орел» и «Союз»

Характеристика	Космический корабль «Орел»	Космический корабль «Союз»
Численность экипажа, человек	4 – 6	1 – 3
Режим автономного полета	30 суток	5,2 суток
При полете в составе орбитальной станции	1 год	200 суток
Масса полезного груза	500 кг	100 кг
Максимальный диаметр	4,4 м	2,72 м
Масса корабля	16,5 т	7220 кг
Высота	6,1 м	6,98 м

В настоящее время разрабатываются космические аппараты для проведения как дистанционных, так и контактных исследований Луны. Среди них орбитальные аппараты под названиями «Луна-26» и «Луна-29», а также посадочные аппараты, предназначенные для работы в различных регионах поверхности спутника Земли: «Луна-27» №1 и №2, «Луна-28» и «Луна-30» [13]. В рамках совместного проекта с Китаем по созданию Международной лунной станции планируется установить электростанцию на поверхности Луны. Китай планирует отправить своих космонавтов на Луну к 2030 году. Миссия «Чанъэ-8», определена на 2028 год, должна будет подготовить почву для создания постоянной обитаемой базы на Луне [14, 15].

К проекту российско-китайской лунной станции подключилось 13 стран. В ноябре 2022 года Москва и Пекин заключили договор о создании станции для освоения и использования Луны [16].

«Спектр-УФ» –космический телескоп, созданный для исследования Вселенной в ультрафиолетовом спектре (рис. 3). Проект реализуется под руководством Института астрономии РАН и НПО имени С.А. Лавочкина [17].

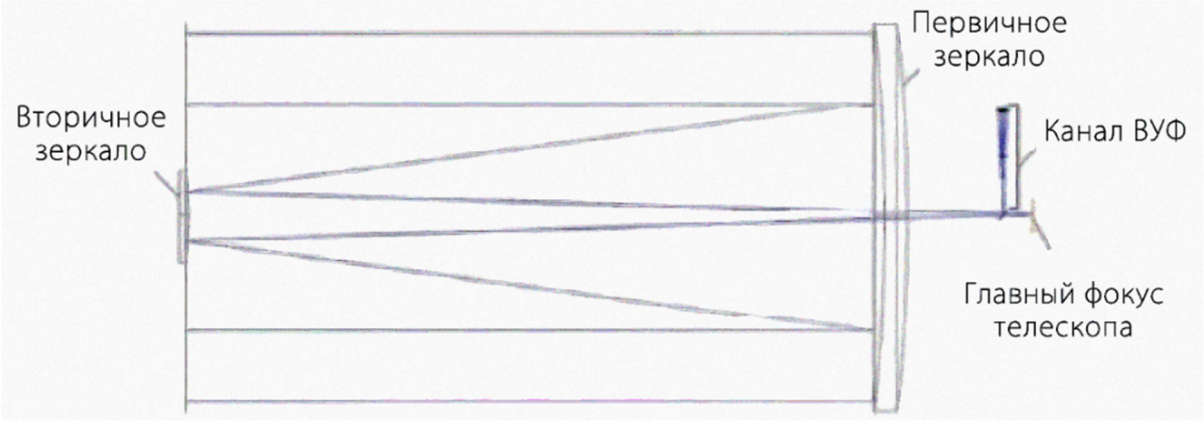


Рис. 3. Принципиальная схема хода лучей в системе телескопа Спектр-УФ

Диаметр главного зеркала телескопа составляет от 1,7 метра, обеспечивающий высокую чувствительность [18]. Прибор работает в широком диапазоне наблюдений: в ультрафиолетовом от 115 до 310 нм и частично оптическом до 700 нм (рис. 4).

Относительное отверстие 1 к 10. В состав научного оборудования входят: спектрометры для анализа спектров звёзд, галактик; камеры для изображений в УФ-диапазоне. Масса прибора составляет около 2,6 тонны. Срок службы телескопа – не менее 5 лет [19, 20].

Руководители космических агентств стран БРИКС одобрили предложенный Роскосмосом проект меморандума о космическом образовании, с целью разработки общих курсов обучения в области космонавтики [21].

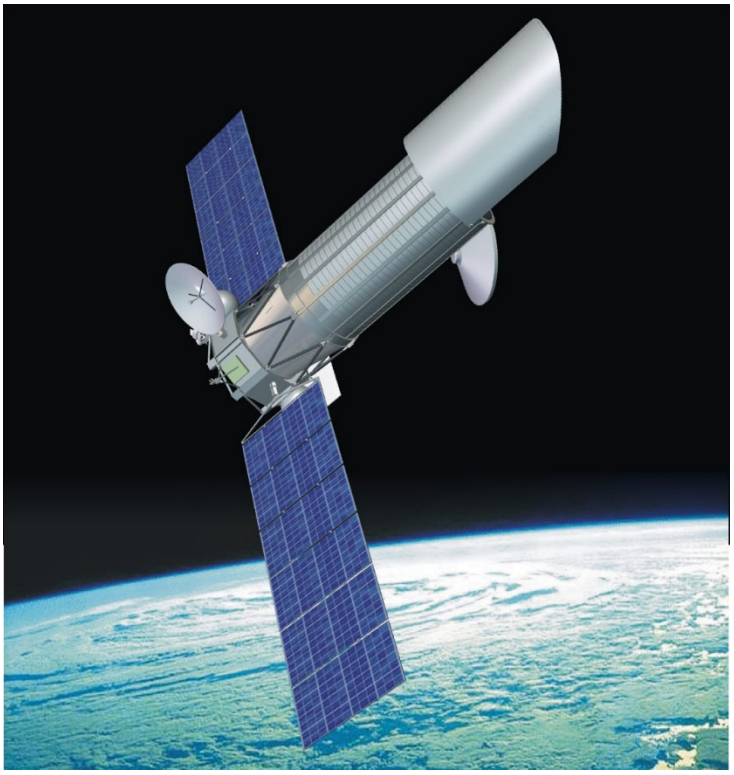


Рис. 4. Телескоп Спектр-УФ

Могут включить курсы по управлению группировками космических устройств и ракетостроению, а также специальные учебные заведения с участием ученых и преподавателей университетов.

Образовательные инициативы БРИКС будут проходить как очно, так и в дистанционном формате.

Эффективным инструментом в этом процессе мог бы стать обмен студентами между вузами стран объединения.

Заключение

Разработка новых космических кораблей в Российской Федерации является важным шагом к дальнейшему развитию ракетостроения. Внедрение новых технологий и материалов, а также международное сотрудничество открывает перспективы для исследования Космоса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Достижение российского космоса к 2025 году. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://ura.news/news/1052916246 21.04.25

2. Российская орбитальная станция: история проекта и его характеристики. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/doc/6805689 22.04.25

3. Названа дата начала работы Российской станции. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://expert.ru/tekhnologii/nazvana-data-nachala-raboty-rossiyskoy-orbitalnoy-stantsii/ 23.04.25

4. «Роскосмос» показал подписанный график создания РОС. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/news/826368/ 23.04.25

5. Итоги российской космонавтики. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://hightech.fm/2025/01/08/roscosmos-year 24.04.25

6. Для РОС могут дополнительно создать астрофизический модуль – президент РАН. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://prokosmos.ru/2024/02/07/dlya-ros-mogut-dopolnitelno-sozdat-astrofizicheskii-modul--prezident-ran 24.04.25

7. Ракета-носитель «Ангара-А5». Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.roscosmos.ru/36320/ 25.04.25

8. К Российской орбитальной станции отправят десять кораблей «Орел». Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://rg.ru/2024/01/23/k-rossijskoj-orbitalnoj-stancii-otpraviat-desiat-korablej-orel.html 26.04.25

9. «Орёл» — новый космический корабль России. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/first/articles/684124/ 25.04.25

10. Для космического «Орла» создали навигационную систему. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.vesti.ru/article/3179042 26.04.25

11. Обносов Б.В., Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А., Францкевич В.П., Животов Н.П., Суриков Е.В., Кобко Г.Г., Тихомиров М.А., Шаров М.С. Конструкция и проектирование комбинированных ракетных двигателей на твердом топливе. учеб. пособ./ под общ. ред. В. А. Сорокина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 303 с.

12. Многоразовость. Как ракете вернуться целой после полёта. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/517132/ 26.04.25

13. РФ намерен запустить к Луне 6 орбитальных и посадочных спутников. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://rg.ru/2025/04/29/rf-namerena-zapustit-k-lune-6-orbitalnyh-i-posadochnyh-avtomaticheskih-apparatov.html 27.04.25

14. Лунный путь Китая: большая гонка – 2. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/doc/6320578 28.04.25

15. Россия и Китай собираются построить атомную электростанцию на Луне: амбициозный план для Международной лунной станции. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ixbt.com/news/2025/04/23/-rossija-i-kitaj-postrojat-atomnuju-jelektrostanciju-na-lune-ambicioznyj-plan-dlja-mezhdunarodnoj-lunnoj-stancii.html 01.05.25

16. К российско-китайскому проекту лунной станции присоединились 13 стран. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/doc/7692952 28.04.25

17. Характеристики блока камер поля для проекта «Спектр-УФ». Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-bloka-kamer-polya-dlya-proekta-spektr-uf 02.05.25

18. Запуск «российского Хаббл» вновь переносится — с 2029 на 2031 год. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ixbt.com/news/2025/04/29/2029-2031-1990.html 29.04.25

19. «Спектр-УФ»: на одной волне со Вселенной. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.roscosmos.ru/38578/ 03.05.25

20. Институт астрономии РАН и НПО им. С. А. Лавочкина заключили договор на создание научной аппаратуры для «Спектр-УФ». Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/news/668274/ 01.05.25

21. Руководители космических агентств стран БРИКС поддержали подготовленный Роскосмосом проект меморандума о космическом образовании. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.roscosmos.ru/41488/ 29.04.25.

© В. Р. Костылева, А. М. Бахтиярова, М. С. Исмаилова, И. В. Парко, 2025

УДК 520.25
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-39-44

В. Р. Костылева[1]✉, В. В. Ильин[1], И. В. Парко[1]

Наблюдая космос по-новому: преимущества смарт-телескопов

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлены смарт-телескопы, разобран сравнительный анализ между Unistellar eVscope и Vaonis Vespera. Особое внимание уделено анализу оптических схем, применяемых в данных моделях, включая рефракторы и рефлекторы, а также их влияние на качество изображения, разрешающую способность и поле зрения. Рассмотрен анализ пользовательского интерфейса и мобильных приложений, используемых для управления телескопами и обмена данными между пользователями. Оценивается удобство использования, функциональность и возможности для образовательных целей. Отдельный раздел посвящен сравнению технических характеристик, таких как диаметр апертуры, фокусное расстояние, увеличение. Сделаны выводы о преимуществах и недостатках смарт-телескопов для различных категорий пользователей, от начинающих любителей астрономии до опытных наблюдателей, заинтересованных в портативности и автоматизации процесса астрономических наблюдений.

Ключевые слова: смарт-телескопы, рефрактор, рефлектор, астрономия

V. R. Kostyleva[1]✉, V. V. Ilyin[1], I. V. Parko[1]

Observing space in a new way: the advantages of smart telescopes

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vika.kostyleva2002@gmail.com

Abstract. This article presents smart telescopes, a comparative analysis between the Unistellar eVscope and Vaonis Vespera. Special attention is paid to the analysis of optical circuits used in these models, including refractors and reflectors, as well as their impact on image quality, resolution and field of view. The analysis of the user interface and mobile applications used to control telescopes and exchange data between users is considered. The user-friendliness, functionality, and educational opportunities are evaluated. A separate section is devoted to comparing technical characteristics such as aperture diameter, focal length, and magnification. Conclusions are drawn about the advantages and disadvantages of smart telescopes for various categories of users, from novice astronomy enthusiasts to experienced observers interested in portability and automation of the astronomical observation process.

Keywords: smart telescopes, refractor, reflector, astronomy

Введение

Смарт-телескопы – это оптико-электронные приборы, позволяющие получать снимки удаленных объектов космоса и возможностью мгновенно делиться снимками с другими людьми. Существует несколько моделей смарт-телескопов, каждая из которых обладает своими особенностями.

Технология Unistellar eVscope – позволяет телескопу в реальном времени накапливать свет от астрономических объектов и с максимальной детализацией отрисовывать звездные скопления, кометы и галактики [1, 2].

Vaonis Vespera – телескоп отличается компактным дизайном и удобством в использовании, что делает его идеальным для начинающих астрономов [3, 4]. Ниже представлен смарт-телескоп Unistellar eVscope (рис. 1).



Рис. 1. Смарт-телескоп Unistellar eVscope

В смарт-телескопе Unistellar используется система Ньютона. Главным элементом оптической системы является зеркальный объектив диаметром 114 мм, он собирает свет от наблюдаемого объекта [5, 6].

В системах Ньютона объективом является высокоточное вогнутое сферическое или параболическое зеркало, которое находится в нижнем конце трубы. Свет, собранный главным зеркалом, отражается на плоское вторичное зеркало, установленное в переднем конце трубы под углом 45°, которое в свою очередь и отражает сходящийся пучок лучей в сторону плоскости изображения, то есть цифровому сенсору [7, 8].

В смарт-телескопе модели Unistellar eVscope встречаются такие недостатки, как:

– фокусировка телескопа Unistellar eVscope осуществляется вручную с помощью ручки на задней части телескопа;

– в данный смарт-телескоп невозможно установить фильтр, кроме солнечного;

– у модели eVscope короткое фокусное расстояние, а также нет возможности добавить линзу Барлоу из-за чего наблюдение планет становится невозможным;

– из-за небольшого размера сенсора IMX224 поле зрения телескопа очень маленькое, а изображение небесных объектов заполнено шумами и горячими пикселями [9, 10].

Приложение Vaonis Vespera (рис. 2) оснащен интерфейсом и большим набором функций, например: приложением Singularity, которое имеет звездный каталог многих астрономических объектах; функцией CovalENS, позволяющее создавать мозаичные снимки ночного неба и формировать несколько снимков разных областей неба, объединять их, чтобы строить увеличенное изображение [11, 12].

Оптическая система Vespera включает в себя встроенный фильтр CLS Light Pollution Filter. Этот фильтр не пропускает определенные длины волн, что позволяет получать более яркие фотографии объектов, даже в условиях городской засветки [13, 14].



Рис. 2 Смарт-телескоп Vespera

Автоматическая фокусировка важная часть оптической системы Vespera и использует встроенные датчики для автоматической настройки фокуса, что обеспечивает получение астрофотографий с высоким разрешением и чувствительно-

стью даже при изменении температуры и других внешних условиях. Это очень удобно для тех, у кого нет опыта в ручной фокусировке телескопа [15, 16].

Ниже изображен снимок туманности Ориона, сделанный с помощью смарт-телескопа Vespera PRO (рис. 3).



Рис. 3 Снимок Туманность Ориона, сделанный
с помощью смарт-телескопа Vespera PRO

У модели смарт-телескопа наблюдаются некоторые недостатки:

– отсутствие окуляра, смотреть за объектом можно только с помощью приложения Singularity, скачанное на ноутбуке или телефоне, обязательно должен быть интернет;

– ограничения по наблюдениям за объектами Солнечной системы – это связанно с тем, что у прибора модели Vespera очень маленькая апертура и фокусное расстояние;

– для лучшей работы устройства предпочтительнее темное небо или фильтр от засветки;

– Vespera представляет собой электронно-оптический прибор, в него входят некоторые элементы, которые нельзя легко заменить или отремонтировать;

– смарт-телескоп при длительном использовании может разрядиться и перестать работать;

– из-за вибраций и ветра телескоп модели Vespera может быть поврежден, поскольку штатив, что идет в комплекте, не оснащен амортизацией [17, 18].

В табл. 1 указаны конструктивные параметры Unistellar eVscope и Vaonis Vespera.

Таблица 1

Конструктивные параметры Unistellar eVscope и Vaonis Vespera

Характеристика	Unistellar eVscope	Vaonis Vespera
Оптическая схема	Катадиоптрическая (зеркально-линзовая) схема Ньютона	Апохроматический рефрактор
Поле зрения	0,61° x 0,46°	1,6° x 0,9°
Диаметр апертуры	114 мм	50 мм
Фокусное расстояние	450 мм	200 мм
Светосила	f/4	f/4
Разрешающая способность	достигает 16 зв. вел. и слабее	достигает 13 зв. вел. и слабее
Матрица	Sony IMX224 (CMOS, монохромная)	Sony IMX462 (CMOS, цветная)
Размер пикселя	3.75 мкм	2.9 мкм
Разрешение изображения	1280 x 960 пикселей	1920 x 1080 пикселей
Увеличение	до 150x	до 100x
Питание	до 9 ч	до 4 ч
Вес	9 кг	5 кг
Размеры	65 см (высота)	40 см (высота)
Особенности	Возможность обнаружения астероидов	Использование цветовой матрицы

Заключение

Смарт-телескопы представляют собой новое направление, способное не только наблюдать за ночным небом, но и рассматривать различные явления, а также участвовать в научных исследованиях, собирая информацию о кометах, планетах и экзопланетах, а также делиться фотографиями сразу. С развитием технологий смарт-телескопы помогут изучить самые дальние объекты Вселенной, к тому же такие приборы можно будет применять в образовательных целях и популяризации астрономии [19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смотрите на звёзды в разрешении 4K: умный телескоп Vaonis Vespera: идеальный умный телескоп для астрофотографии как для начинающих, так и для опытных любителей. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.space.com/vaonis-vespera-ii-2-smart-telescope-launch-2024 22.04.25

2. Unistellar eVscope. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unistellar.com/ 22.04.25

3. Лучший умный телескоп 2025 (Unistellar, Vaonis, Seestar, Dwarf). Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://skiesandscopes.com/telescopes-that-take-pictures-stellina-evscope/ 21.04.25

4. Vaonis Vespera. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://vaonis.com/ 27.04.25

5. Unistellar представила новые телескопы. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://news.rambler.ru/tech/52060057/?utm_content=news_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink 23.04.25

6. Цифровой телескоп Unistellar eVscope в комплекте с рюкзаком. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://astronomy-shop.ru/product/tsifrovoy-teleskop-unistellar-evscope-2-v-komplekte-s-ryukzakom/ 25.04.25

7. Схема Ньютона (рефлектор). Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.astro-talks.ru/forum/viewtopic.php?t=79

8. Обзор интеллектуального телескопа Unistellar eQuinox. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.digitalcameraworld.com/reviews/unistellar-equinox-2-smart-telescope-review 28.04.25

9. Отзывы о Цифровой смарт-телескоп Unistellar eQuinox 2. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://teleskop-pro.ru/p/cifrovoy-smart-teleskop-unistellar-equinox-2/reviews 24.04.25

10. Устранение неполадок в Unistellar. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://helpmoji.com/iphone/8d646db3-9e75-4031-8415-bfe844c97455 26.04.25

11. CLS фильтр Vaonis для Vespera. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://oculuslens.ru/telescope/teleskopy-po-firmam/tsifrovye-smart-teleskopy-vaonis/cls-filtr-vaonis-dlya-vespera/ 28.04.25

12. Обзор Vaonis Vespera: идеальный умный телескоп для астрофотографии как для начинающих, так и для опытных любителей. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.digitalcameraworld.com/reviews/vaonis-vespera-ii-review 01.05.25

13. Vespera – маленький и мощный умный телескоп – полный обзор. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.galactic-hunter.com/post/vespera 02.05.25

14. Обзор Vaonis Vespera Учебное пособие. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://astroforumspace.com/vaonis-vespera-pro-review-tutorial/ 04.05.25

15. Сравнение фотографий Vaonis Vespera и Unistellar eVscope. Статья. [Электронный ресурс]. URL: http://www.waloszek.de/astro_va_vespera_evscope_ vgl2_e.php 07.05.25

16. Обзор цифрового телескопа Unistellar eVscope eQuinox. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://star-hunter.ru/unistellar-evscope-equinox-review/ 03.05.25

17. Больше и лучше – Мы протестировали модернизированный интеллектуальный телескоп Vaonis Vespera II, чтобы посмотреть, как он работает. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.skyatnightmagazine.com/reviews/vaonis-vespera-ii-smart-telescope 04.05.25

18. Отзывы о Цифровой смарт-телескоп Vaonis Vespera. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://teleskop-pro.ru/p/cifrovoy-smart-teleskop-vaonis-vespera-essential-set/reviews 05.05.25

19. Цифровой телескоп Unistellar eVscope eQuinox. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://astronomico.ru/product/digital_telescope_unistellar_evscope_equinox/ 06.05.25

20. Цифровой смарт-телескоп Vaonis Vespera. Статья. [Электронный ресурс]. URL: https://www.telescope.ru/product/tsifrovoy-smart-teleskop-vaonis-vespera-essential-set/ 06.05.25

© В. Р. Костылева, В. В. Ильин, И. В. Парко, 2025

УДК 629.7
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-45-49

Е. А. Лебедев[1]✉, *Е. Г. Бобылева*[1]

Решение проблемы деламинации триплекса

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: creomaster08@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются наиболее эффективные пути решения проблемы деламинации триплекса на стадии производства. Были изучены разновидности ламинированного стекла, использующие разные полимерные материалы в качестве промежуточного слоя. Были рассмотрены недостатки наиболее распространенного в современном мире вида триплекса, ведущие к возникновению деламинации. Объектом изучения стало ламинированное стекло на основе поливинилбутиральной пленки и его аналог с промежуточным слоем из этиленвинилацетатной пленки. Был произведен сравнительный анализ характеристик двух видов триплекса, влияющих как на возникновение деламинации, так и не относящихся к вышеуказанному дефекту. В результате были определены основные характеристики этиленвинилацетатного триплекса, исключающие возможность возникновения деламинации и ставящие его на место наилучшего безопасного материала для остекления транспорта и зданий.

Ключевые слова: триплекс, деламинация

E. A. Lebedev[1]✉, *E. G. Bobilyova*[1]

Solving the triplex delamination problem

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: creomaster08@gmail.com

Abstract. The article discusses the most effective ways to solve the problem of triplex delamination at the production stage. Varieties of laminated glass using different polymer materials as an intermediate layer have been studied. The disadvantages of the most common type of triplex in the modern world, leading to delamination, were considered. The object of study was laminated glass based on polyvinyl butyral film and its analogue with an intermediate layer of ethylene vinyl acetate film. A comparative analysis of the characteristics of two types of triplex was performed, affecting both the occurrence of delamination and not related to the above defect. As a result, the main characteristics of ethylene vinyl acetate triplex were determined, eliminating the possibility of delamination and putting it in the place of the best safe material for glazing vehicles and buildings.

Keywords: triplex, delamination

Введение

В современном мире большинство зданий, а также все автомобили, от легковых до тяжелой техники, имеют в своей структуре многослойное стекло – ПВБ-триплекс, обеспечивающее безопасность при эксплуатации, благодаря своей способности сохранять форму при разбивании и удерживать опасные осколки [1–4].

Однако этот материал подвержен губительному воздействию окружающей среды и при неправильной эксплуатации теряет свои свойства. Потеря адгезивных свойств стекла и ослабевание химических связей в пленке приводят к отслоению слоёв ламинированного стекла друг от друга [5, 6].

Деламинация

Деламинация – явление расслоения триплекса на первоначальные компоненты из-за изменения свойств пленки с течением времени или под воздействием окружающей среды. Деламинация полностью лишает ламинированное стекло своих свойств и способна распространяться внутри поверхности материала после возникновения на небольшом участке [7].

Причинами, влекущими возникновение деламинации могут быть:

1) Хранение ПВБ-пленки при несоответствующей температуре и влажности, в следствие снижение адгезии [8].

2) Высокая влажность. Из-за наличия поляризованных спиртовых групп в составе ПВБ, гигроскопичность материала значительно повышается, и вода в жидком или газообразном состоянии проникает в молекулярные связи, ослабляя связь между слоями.

3) Неправильные параметры при запекании в автоклаве. При слишком высокой температуре и давлении, большое число промежуточных слоев пленки будет переливаться, а при слишком низких параметрах, пленка и стекло не смогут полноценно склеиться.

4) Слишком тонкий промежуточный слой. При использовании закаленного стекла, поверхность которого не такая ровная как у отожженного стекла, в некоторых местах слой пленки может оказываться недостаточно толстым и отслаиваться [9].

5) Воздействие солнечных лучей. Негативное влияние солнечного света обусловлено тем, что энергия, переносимая волнами, в том числе в виде частиц, может запускать процесс деградации химических связей между стеклом и пленкой. По этой причине для тестирования многослойного стекла часто используются ксеноновые лампы. Также ПВБ пленка начинает выцветать при длительном облучении ультрафиолетом.

Причины возникновения деламинации

Причинами проявления деламинации могут послужить:

1) Хранение ПВБ-пленки при несоответствующей температуре и влажности, в следствие снижение адгезии [10].

2) Высокая влажность. Из-за наличия поляризованных спиртовых групп в составе ПВБ, гигроскопичность материала значительно повышается, и вода в жидком или газообразном состоянии проникает в молекулярные связи, ослабляя связь между слоями [11].

3) Неправильные параметры при запекании в автоклаве. При слишком высокой температуре и давлении, большое число промежуточных слоев пленки бу-

дет переливаться, а при слишком низких параметрах, пленка и стекло не смогут полноценно склеиться [12, 13].

4) Слишком тонкий промежуточный слой. При использовании закаленного стекла, поверхность которого не такая ровная как у отожженного стекла, в некоторых местах слой пленки может оказываться недостаточно толстым и отслаиваться [14].

5) Воздействие солнечных лучей. Негативное влияние солнечного света обусловлено тем, что энергия, переносимая волнами, в том числе в виде частиц, может запускать процесс деградации химических связей между стеклом и пленкой. По этой причине для тестирования многослойного стекла часто используются ксеноновые лампы. Также ПВБ пленка начинает выцветать при длительном облучении ультрафиолетом [15–17].

ЭВА-триплекс

В последнее время возрастает популярность аналога ПВБ-триплекса на основе EVA пленки. Он уже применяется в большом количестве крупных городов, как материал для остекления зданий, а его внедрение в автомобилестроение может искоренить проблему деламинации лобовых стекол и понизить их стоимость [18, 19].

Этиленвинилацетат является более стойким соединением, с меньшей гигроскопичностью и чувствительностью к солнечному свету. Главными преимуществами EVA-триплекса над ПВБ собратом являются:

1) Долговечность. Пленка EVA имеет высокую прочность на разрыв и стойкость к химическим воздействиям[20].

2) Устойчивость к УФ-излучению, что предотвращает выцветание и разрушение стекла под воздействием солнечного света.

3) Простота работы. Не требуется сложное оборудование, что упрощает процесс ламинирования и снижает затраты на производство.

4) Прозрачность и качество изображения. Пленка EVA обеспечивает кристально чистое изображение без искажений.

Заключение

В результате сравнительного анализа характеристик ЭВА-триплекса и ПВБ-триплекса, было выяснено что ламинированное стекло на основе этиленвинилацетатной пленки не имеет недостатков поливинилбутирального триплекса, являющихся причиной появления деламинации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ПриорГласс : Технология изготовления триплекса (часть 1) : [официальный сайт]. – URL : https://priorglass.ru/stat-i/tekhnologiya-proizvodstva-tripleksa-ch/ (дата обращения: 03.04.25). – Режим доступа : свободный.

2. ПриорГласс : Технология изготовления триплекса (часть 2) : [официальный сайт]. – URL : https://priorglass.ru/stat-i/tekhnologiya-proizvodstva-tripleksa-ch-2/ (дата обращения: 03.04.25). – Режим доступа : свободный.

3. Glass Course : Триплекс (ламинированное или многослойное стекло) : [официальный сайт]. – URL : https://glasscourse.ru/laminated_glass?ysclid=m25ueobw8e945889822 (дата обращения: 02.04.25). – Режим доступа : свободный.

4. ГОСТ 30698-2014 «Стекло закалённое». – Москва : Изд-во стандартов, 2014. – 20 с. – Текст : электронный. – URL : https://gostexpert.ru/data/files/30698-2014/65343.pdf (дата обращения: 02.04.25). – Режим доступа : свободный.

5. Аплика : Производственные дефекты стеклопакетов: [официальный сайт]. – URL : https://www.alpicagroup.ru/proizvodstvo/proizvodstvo_steklopaketov/proizvodstvennye-defekty-steklopaketov.html (дата обращения: 01.05.25). – Режим доступа : свободный.

6. ГОСТ 32565-2013 «Стекло безопасное для наземного транспорта. Технические условия». – Москва : Госстандарт СССР, 1988. – 53 с. – Текст : электронный. – URL: https://tonirovkamoskva.ru/wp-content/uploads/2019/05/gost-32565-2013.6185.pdf (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

7. Tybet ru : Деламинация триплекса – что кроется за этим дефектом остекления? : [официальный сайт]. – URL: https://tybet.ru/content/articles/index.php?SECTION_ID=371&ELEMENT_ID=124097 (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

8. Триплекс. Информация. Ограничения. Технические условия – Томск : Завод закалённого стекла, 2023. – 4 с. – Текст : электронный. – URL : https://zzsglass.ru/wp-content/uploads/2024/04/Tripleks.-Informatsiya.-Ogranicheniya.-Tehnicheskie-usloviya.pdf (дата обращения: 02.04.25). – Режим доступа : свободный.

9. В стекольном мире: Деламинация: [официальный сайт]. – URL : https://sa-glass.blogspot.com/2016/02/blog-post_37.html (дата обращения: 01.05.25). – Режим доступа : свободный.

10. ГОСТ 30826—2014 «Стекло многослойное. Технические условия». – Москва : Изд-во стандартов, 2014. – 120 с. – Текст : электронный. – URL : https://mirrorglass.ru/wp-content/uploads/2017/04/ГОСТ-30826-2014.pdf?ysclid=ma2982cb6x617771342 (дата обращения: 02.04.25). – Режим доступа : свободный.

11. Стекло Люкс : Стекло триплекс : [официальный сайт]. – URL : https://stekloluks.by/tripleks (дата обращения: 03.05.25). – Режим доступа : свободный.

12. МИР СТЕКЛА-2026 : Триплекс : [официальный сайт]. – URL : https://www.mir-stekla-expo.ru/ru/articles/tripleks/?ysclid=mbhze14s2r212054996 (дата обращения: 01.05.25). – Режим доступа : свободный.

13. Hartec : Стекло триплекс : [официальный сайт]. – URL : https://hartec.ru/articles/polezno/cteklo-tripleks-chto-eto-ego-kharakteristiki-i-gde-primenyaetsya/?ysclid=mbhzisokb3354-289583 (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

14. Перила ГлавСнаб : Стекло триплекс : [официальный сайт]. – URL : https://www.perilaglavsnab.ru/stati/steklo_tripleks/?ysclid=mbhz8xit7j375739582 (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

15. Дитс Сервис : Тестирование стекла на прочность: технология и правила : [официальный сайт]. – URL : https://dits-servis.by/polezno-znat/testirovanie-stekla-na-prochnost-tekh/ (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

16. ГОСТ Р 51136—2008 «Стекла защитные многослойные. Общие технические условия». – Москва : Изд-во стандартов, 2008. – 34 с. – Текст : электронный. – URL : https://meganorm.ru/Data/476/47614.pdf (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

17. ОкнаМедиа : Что такое триплекс : [официальный сайт]. – URL : https://www.oknamedia.ru/novosti/chto-takoe-tripleks-48754 (дата обращения: 03.05.25). – Режим доступа : свободный.

18. Clemar : Триплекс : [официальный сайт]. – URL : https://clemar.ru/stati/tripleks/ (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

19. СтеклоИнструмент : Плёнка EVA : [официальный сайт]. – URL : https://stekloinstrument.ru/osteklenie/plenka-protivooskolochnaya/1plenka-EVA/?yclid=15535056678261358591 (дата обращения: 02.05.25). – Режим доступа : свободный.

20. Окна Трейд : Стёкла триплекс – безопасность, эстетичность и высокие технологии : [официальный сайт]. – URL : https://www.oknatrade.ru/help/stekla-tripleks-bezopasnost-estetichnost-i-vysokie-tekhnologii/ (дата обращения: 03.05.25). – Режим доступа : свободный.

© Е. А. Лебедев, Е. Г. Бобылёва, 2025

УДК 681.787
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-50-60

И. А. Выхристюк[1]✉, С. Д. Жданов[1,2], Р. В. Куликов[1], Е. В. Сысоев[1]

Исследование влияния неравномерности скорости сканирования на результаты измерения рельефа поверхности интерференционным профилометром

[1]Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: I_Vykhristyuk@mail.ru

Аннотация. Исследованы причины возникновения систематической погрешности измерения высоты рельефа интерференционным профилометром. Проведено моделирование процесса измерения. Выявлено влияние неравномерности скорости сканирования на систематическую погрешность измерения.

Ключевые слова: интерферометр белого света, профилометр, погрешность измерения

I. A. Vykhristyuk[1]✉, S. D. Zhdanov[1,2], R. V. Kulikov[1], E. V. Sysoev[1]

Study of the influence of scanning speed non-uniformity on the results of surface relief measurement by an interference profilometer

[1]Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: I_Vykhristyuk@mail.ru

Abstract. The causes of the systematic measurement error in the interference profilometer are investigated. The measurement process is simulated. The influence of the scanning speed non-uniformity on the systematic measurement error is revealed.

Keywords: white light interferometer, profilometer, measurement error

Введение

Измерение рельефа поверхности интерферометром белого света методами фазового сдвига производится смещением (сканированием) интерферометра или эталонного объекта относительно измеряемой поверхности, или наоборот. В процессе сканирования регистрируются интерферограммы, затем по их набору восстанавливается профиль поверхности [1].

Неопределенность положения сканирования является одним из факторов, приводящих к ошибкам измерения [2].

При изготовлении относительно недорогих профилометров для контроля качества промышленных изделий с разрешающей способностью по глубине по-

рядка микрометра [3,4] сканирование может производиться моторизованным столом.

В статье [5] описан эксперимент, позволивший обнаружить неравномерность скорости движения стола внутри одного шага шагового двигателя, обеспечивающего сдвиг профилометра на ~ 5 мкм, что может приводить к ошибкам в измерениях в микродиапазоне.

В данной работе исследуется влияние неравномерности скорости движения моторизованного стола отдельно взятого профилометра на погрешность измерения профиля поверхности методом дифференциальных интерферограмм [6]. Проведено моделирование процесса измерения, исследован вклад различных факторов в ошибку измерения, проведен анализ возможности снижения ошибки, вызванной неравномерностью движения. Выполнено сравнение результатов моделирования с натурным экспериментом.

Выявление систематической погрешности измерения

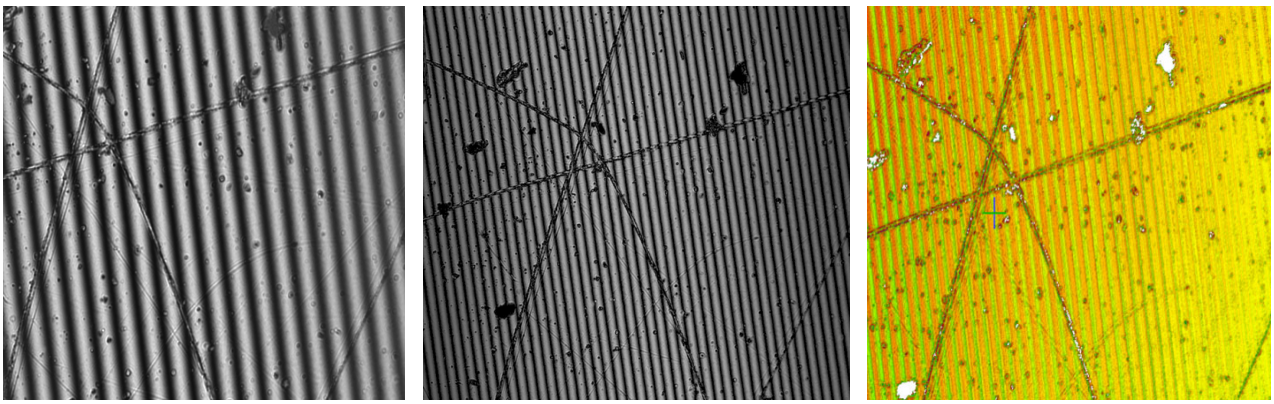
Метод дифференциальных интерферограмм разрабатывался для измерения рельефа поверхностей с шероховатостью порядка 1 мкм. На таких поверхностях сложно следить за фазой интерференционного сигнала. Можно лишь фиксировать наличие или отсутствие интерференции в пикселе на определенных шагах сканирования.

В первых приборах, реализующих данный метод, сканирование производилось в пошаговом режиме [3]. Вначале моторизованный стол сдвигает интерферометр на 1 мкм, затем регистрируются две противофазные интерферограммы, для чего используется пьезокерамический актюатор, сдвигающий зеркало в опорном плече на величину ~ $\lambda/4$ (четверть эффективной длины волны источника света).

С появлением высокопроизводительных графических ускорителей стало возможно вычислять дифференциальные интерферограммы со скоростью регистрации кадров видеокамерой. При этом отпала необходимость в пошаговом сканировании. Требуется только синхронизировать скорость сканирования и частоту получения кадров, чтобы смещение интерферометра между кадрами составляло ~ $\lambda/4$.

Для исследования предельных характеристик профилометра измерялась поверхность плоского оптического зеркала. В результате измерения обнаружена погрешность, представляющая собой неровности в виде волн, повторяющие на плоскости форму интерференционных полос в интерферограммах при сканировании (рис. 1).

Измеряемая область поверхности зеркала имеет размеры 1,12 мм × 0,7 мм. Наклон зеркала приводит к перепаду высот в основном вдоль оси X на величину 34 мкм. Профилометр измеряет рельеф в 1920 × 1200 точках.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Связь формы интерференционных полос и ошибки измерения:
а – интерферограмма, б – дифференциальная интерферограмма,
в – 3D-результат измерения, вид сверху

Волны на измеренном рельефе отклоняются от базовой плоскости на величину ΔD с локальной амплитудой от 0,2 до 1 мкм для сканирования с шагом 1 мкм, и от 0,1 до 0,5 мкм для сканирования с шагом 0,5 мкм. Амплитуда волн изменяется плавно (рис. 2 и 3).

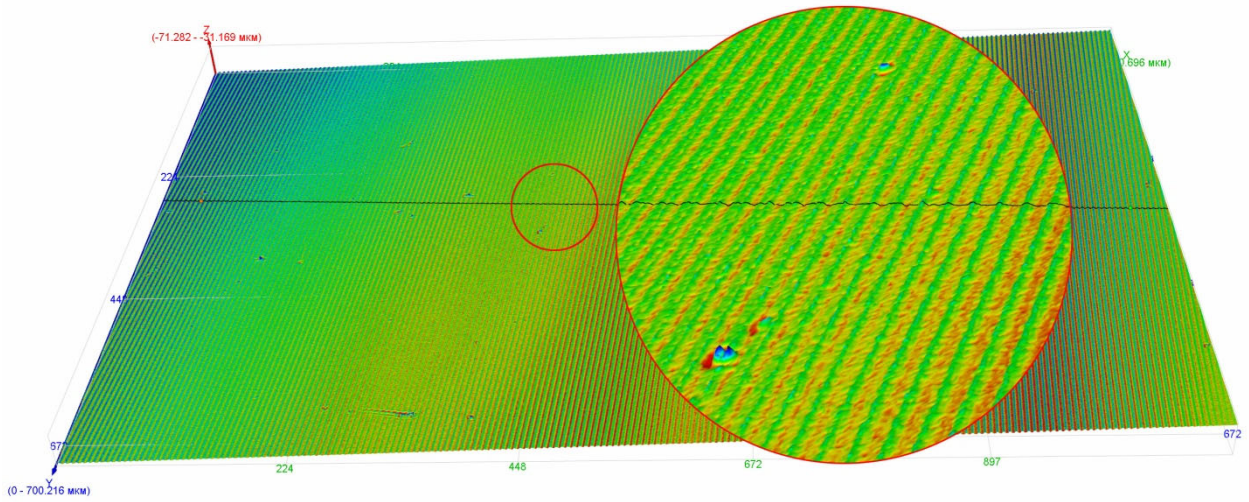


Рис. 2. Измеренный с шагом 1 мкм рельеф поверхности: 3D-модель с линией сечения и увеличенным фрагментом

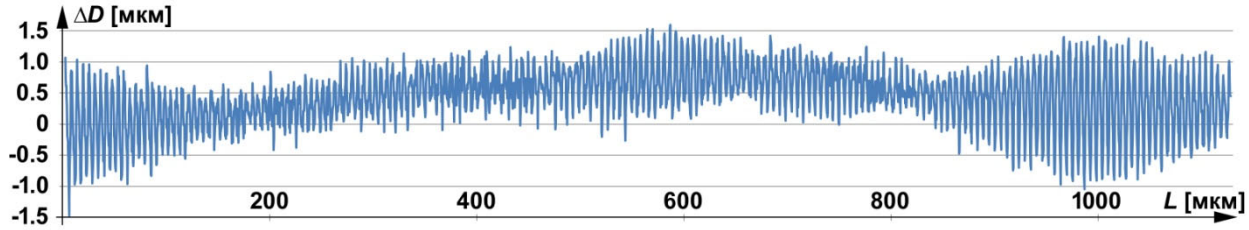


Рис. 3. Отклонение рельефа от базовой плоскости вдоль линии сечения

Так как ошибка, очевидно, носит систематический характер, то ее устранение возможно после понимания причин ее возникновения. С этой целью проведено численное исследование влияния различных факторов на ошибку измерения.

Моделирование процесса измерения

В случае интерференции частично когерентных волн распределение интенсивности светового потока в интерферограмме описывается известной функцией [7]:

$$I(z,h) = I_0 \cdot \left(1 + b(z,h) \cdot \cos\left(4\pi \frac{z-h}{\lambda}\right)\right),$$

где I_0 – среднее значение интенсивности светового потока, b – модуль комплексной степени когерентности, z – текущее положение опорного зеркала (текущая координата), h – положение измеряемой поверхности, λ – эффективная длина волны. При использовании источника света с гауссовым спектром плотности мощности излучения модуль комплексной степени когерентности может быть записан в виде:

$$b(z,h) = A \cdot \exp\left(-4 \cdot \left(\frac{z-h}{l_c}\right)^2\right),$$

где A – амплитуда интерференционного сигнала, l_c – длина когерентности света, рассчитанная по уровню $e^{-1} \cdot A$.

При моделировании процесса измерения участка поверхности с высотой h формируется набор действительных координат сканирования $Z^R = \left\{ Z_k^R \mid k \in \{1,...K\} \right\}$ и соответствующий ему набор действительных интенсивностей (корелограмма) $I^R(h) = \left\{ I(z,h) \mid z \in Z^R \right\}$.

Далее набор Z^R преобразуется в набор $Z^M = \left\{ Z_k^M \mid k \in \{1,...K\} \right\}$ измеренных координат сканирования. При этом действительные координаты могут получить случайную добавку и подвергнуться снижению точности до определенного уровня (например, до 0,1 мкм, как в исследуемом приборе).

Набор $I^R(h)$ преобразуется в набор $I^M(h) = \left\{ I_k^M \right\}$ зарегистрированных интенсивностей. Здесь интенсивность может быть подвергнута дискретизации, добавлению шума и пороговому отсечению (например, 0 – 255).

По наборам Z^M и $I^M(h)$ и коэффициенту порога обнаружения интерференции I_{thr}, используя алгоритмы метода дифференциальных интерферограмм, вычисляется h^M – измеренная высота:

$$h^M = \sum_{d \in D} \overline{z}_d \cdot w_d \,, \qquad (1)$$

где $D = \left\{ d \in D\{2,3,...K\} \,|\, \left| I_d^M - I_{d-1}^M \right| > I_{thr} \cdot \sqrt{I_d^M + I_{d-1}^M} \right\}$,

$$\overline{z}_d = \frac{z_d^M + z_{d-1}^M}{2},$$

$$w_d = \left| I_d^M - I_{d-1}^M \right| - I_{thr} \cdot \sqrt{I_d^M + I_{d-1}^M} \,.$$

То есть, измеренная высота является средневзвешенной измеренной координатой сканирования тех шагов, на которых была обнаружена интерференция. При этом весом является уровень интерференционного сигнала, а порог пропорционален корню из средней интенсивности [8]. Отдельно надо отметить, что при вычислении $I^R(h)$, из которых формируются $I^M(h)$, используются значения действительных Z^R, а не измеренных Z^M координат. Значения Z^M используются только для вычисления h^M.

Численный эксперимент

Будем рассматривать влияние на ошибку измерения следующих факторов: потеря точности при измерении положения интерферометра (датчик перемещения), дискретизация и зашумление регистрируемой интенсивности при оцифровке (матрица видеокамеры), неравномерность шагов сканирования, вызванная неравномерностью скорости движения интерферометра (моторизованный стол).

Зададим параметрам модели следующие значения, соответствующие исследуемому прибору и способу измерения: l_c = 10 мкм, λ = 630 нм, I_0 = 125, A = 25, I_{thr} = 1.

Моделирование производится для режимов DIs1 – пошаговый с шагом 1 мкм, DIs0.5 – пошаговый с шагом 0,5 мкм, DI2 – непрерывный по двум интерферограммам, DI10 – непрерывный по 10 интерферограммам.

DI*N* является модификацией метода, при которой шаги сканирования меньше в *N*–1 раз, а при вычислениях на каждом шаге сканирования используется набор из *N* последних интерферограмм. В вычислениях (1) участвует только та пара, модуль разницы которых максимален. Этот режим разрабатывался для снижения влияния неопределенности координаты сканирования на ошибку измерения. Чем больше *N*, тем устойчивее измерения, но тем больше требования к вычислительной мощности.

Проверка осуществляется для различных положений h в диапазоне от –6 до 6 мкм (диапазон больше длины когерентности) с шагом 1 нм. Ошибка измерения $\varepsilon = h - h^M$ может быть отрицательной, но для сравнения режимов будем использовать максимум модуля.

Для определения наилучших точностных характеристик, которые можно получить при измерениях, моделировалась ситуация, когда $Z^M = Z^R$ и $I^M(h) = I^R(h)$. Результаты приведены на рис. 4 и в итоговой табл. 1 в строке «Предел точности».

Для пошаговых режимов видна периодическая ошибка с амплитудой ~100 нм и периодом λ/4, что объясняется несимметричностью «попадания» координат сканирования в измеряемые высоты. DI2 дает практически идеальный результат, но имеет неизмеренные области, соответствующие тем, где уровень интерференционного сигнала на всех шагах сканирования близок к среднему значению яркости. DI10 имеет систематическую ошибку ~5 нм, но не имеет неизмеренных зон, и ошибка меньше отклоняется от среднего значения.

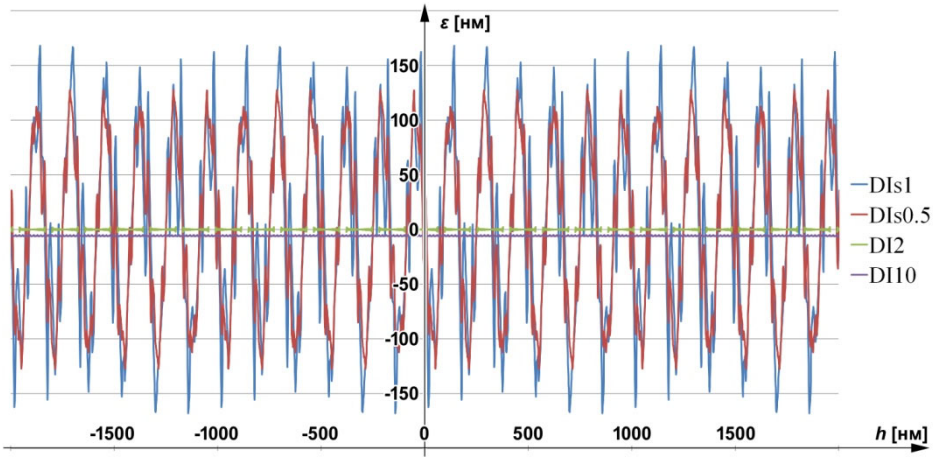


Рис. 4. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты

Влияние оцифровки координаты сканирования

При измерении профиля поверхности методом дифференциальных интерферограмм используется отсчетное устройство, позволяющее определять взаимное смещение интерферометра и объекта измерения. Отсчетное устройство в исследуемом приборе имеет разрешающую способность 0,1 мкм, в связи с чем моделирование будет производиться со следующим преобразованием (координаты z имеют размерность мкм):

$$z_k^M := \mathrm{round}\left(10 \cdot z_k^R\right) \cdot 0{,}1.$$

Проведенное моделирование показало, что для пошаговых методов ничего не изменилось. Очевидно, на это повлияло то, что шаги и значения координаты сканирования были кратны разрешающей способности. Для непрерывных режимов ошибка возросла примерно на 50 нм и для DI2 приобрела более выраженный периодический характер.

Результаты приведены в табл. 1 в строке «Датчик перемещения» и на рис. 5.

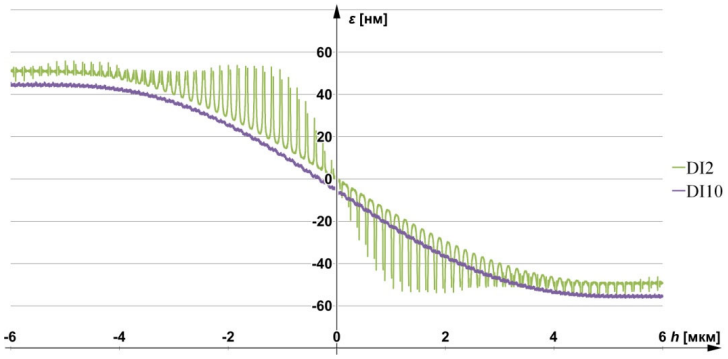


Рис. 5. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании влияния датчика перемещения

Влияние оцифровки интенсивности и шума сигнала

При моделировании оцифровки интерферограмм использован уровень шума, замеренный на профилометре. При средней яркости пикселя 40 величина стандартного отклонения (шум) составляет 0,65, для яркости 240 – 1,35. Моделирование проводилось по следующей схеме:

$$I_k^M := Байт\left(I_k^R + Шум\left(I_k^R\right)\right),$$

где $Шум(x)$ – случайная величина с нормальным распределением ($\mu = 0$, $\sigma = 0{,}65 + 0{,}7\cdot(x - 40)/200$), $Байт(x) = \max(0, \min(255, \text{round}(x)))$ – функция округления и проверки выхода за границы допустимых значений.

Добавление шума в интерферограммы для DI2 привело к появлению периодических выбросов до 1,3 мкм. Эти выбросы находятся недалеко от границ областей, которые не были измерены при отсутствии шума. Они могут быть уменьшены до десятков нанометров повышением коэффициента порога, но для сравнения режимов используются одинаковые параметры модели, близкие к реальным.

Результаты приведены в табл. 1 в строке «Матрица видеокамеры» и на рис. 6.

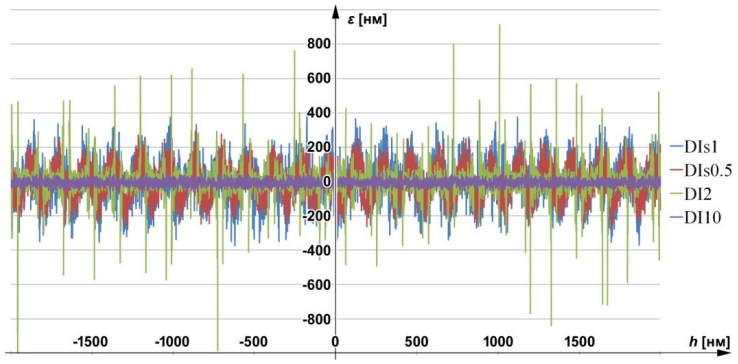


Рис. 6. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании влияния матрицы видеокамеры

Влияние неравномерности скорости сканирования

Наблюдение за дифференциальными интерферограммами (для визуализации дифференциальная интерферограмма преобразуется в изображение, где яркость пикселя соответствует модулю разности яркостей противофазных интерферограмм) в процессе измерения наклонной поверхности в режиме DI2 выявило периодические изменения яркости вплоть до полного исчезновения интерференционного сигнала (уровень ниже порога) на некоторых шагах. Это навело на мысль о неравномерности скорости сканирования. В результате эксперимента [5] получены коррелограммы с заметными периодическими растяжениями и сжатиями с периодом ~5 мкм, что соответствует перемещению интерферометра моторизованным столом за один шаг шагового двигателя.

Для моделирования такого поведения моторизованного стола проводились следующие преобразования с набором действительных координат сканирования:

$$z_k^R := z_k^R + A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(z_k^R - C\right) \Big/ B\right)$$

где A = 1 мкм – амплитуда, B = 5 мкм – период, C = 2,5 мкм – центр неравномерности скорости перемещения моторизованного стола. Параметры A и B подбирались для соответствия натурному эксперименту, C – для отображения результатов численного эксперимента.

Моделирование неравномерности движения моторизованного стола оказала самое сильное влияние на все режимы, кроме DI2, но если не учитывать артефактные выбросы при моделировании матрицы, то и на него. Характер и величина ошибки близки к величинам, полученным на экспериментальных данных.

Результаты приведены в табл. 1 в строке «Моторизованный стол» и на рис. 7.

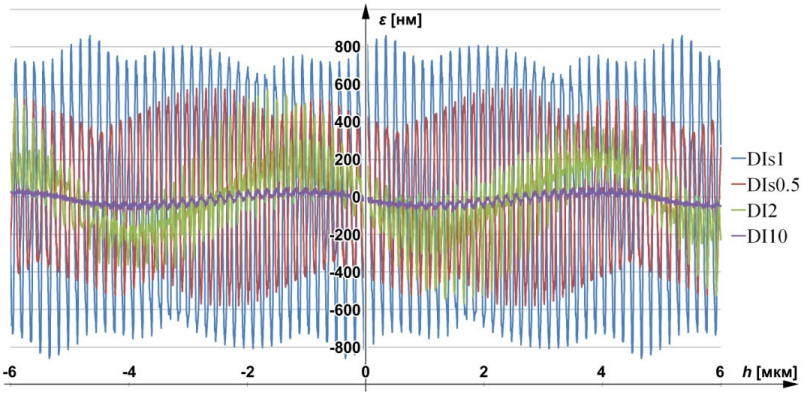


Рис. 7. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании влияния моторизованного стола

Влияние всех факторов, сравнение с натурным экспериментом

При использовании в моделировании всех факторов получен результат, показанный в табл. 1 в строке «Все факторы» и на рис. 8.

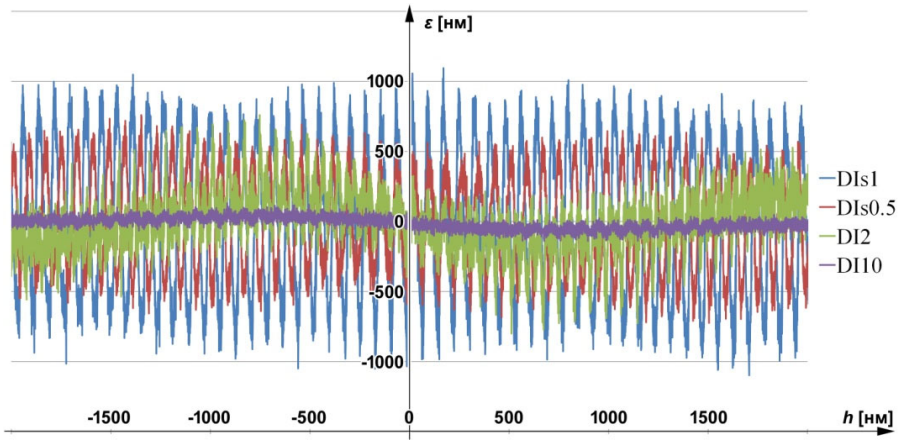


Рис. 8. Зависимость ошибки измерения от измеряемой высоты при моделировании всех факторов

Таблица 1

Максимальная величина ошибки (нм)

	DIs0.5	DIs1	DI2	DI10
Предел точности	127,4	168,1	2,2	6,1
Датчик перемещения	127,4	168,1	55,7	56,3
Матрица видеокамеры*	361,9	462,2	1312,7	90,7
Моторизованный стол	579,7	860,7	569,3	69,5
Все факторы*	741,5	1138,6	818,1	167,0

*Максимальные значения не постоянны, так как при моделировании используются случайные величины. Множественные эксперименты для получения статистики не проводились.

Для сравнения моделирования с натурным экспериментом наклонное зеркало измерялось во всех режимах (см. табл. 2). Лучший результат показал режим DI10 (рис. 9). Стоит отметить, что измерение в режиме DIs0.5 заняло 2 минуты, а в режимах DI2 и DI10 около 10 секунд.

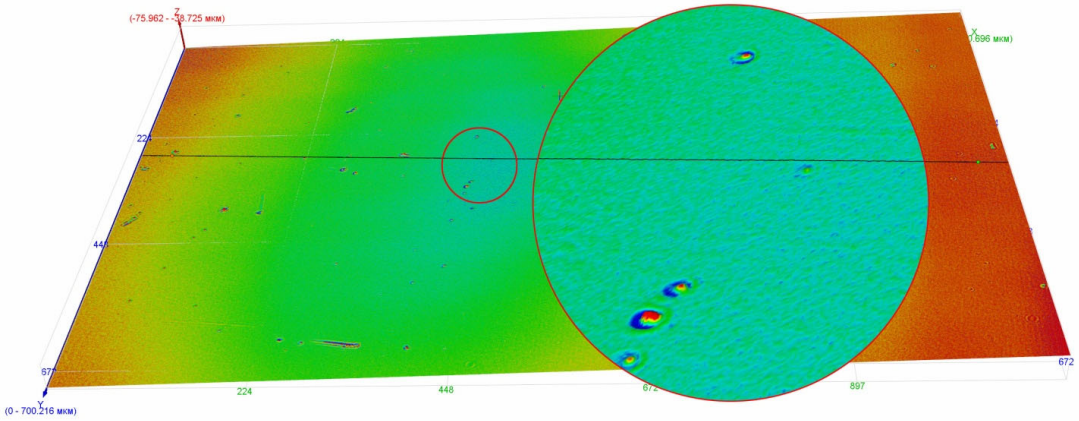


Рис. 9. Измеренный в режиме DI10 рельеф поверхности: 3D модель с линией сечения и увеличенным фрагментом

Как видно, волнистость практически исчезла (сравним с рис. 2). Есть отклонение от плоскости, выраженное в прогибе центральной части рельефа. Это может быть вызвано как все той же неравномерностью движения стола, так и фазовой аппаратной функцией интерферометра, или неравномерностью уровня освещения по полю.

Таблица 2

Отклонения от плоскости в натурном эксперименте (нм)

	DIs0.5	DIs1	DI2	DI10
Ra (среднее)	257	372	306	153
RMS (среднеквадратичное)	332	474	417	188

Заключение

Выявлена систематическая погрешность измерения интерференционным профилометром. Написана математическая модель формирования измерительных данных. Сравнение результатов моделирования с натурными экспериментами показало:

1) соотношение величин ошибок для различных режимов совпадает;

2) величины и характер поведения ошибок схожи.

Анализ результатов моделирования процесса измерения методом дифференциальных интерферограмм в различных режимах показал:

1) наибольший вклад в ошибку измерения среди всех рассмотренных факторов вносит неравномерность скорости сканирования;

2) ошибка, связанная с фотоприемным устройством, для пошаговых режимов увеличивается в два раза относительно предела. Для DI2 приводит к артефактным выбросам, которые, при включении остальных факторов, пропадают, как отдельное явление;

3) ошибка, связанная с датчиком перемещения, для непрерывных режимов не превышает 60 нм и имеет очень гладкий характер.

Использование метода DI10 позволило снизить уровень систематической погрешности в натурном эксперименте: по полю в 2 раза, локально – практически до нуля. Максимальная величина погрешности снизилась незначительно, но характер ее изменился.

Результаты моделирования и численного эксперимента позволяют надеяться, что при устранении причин систематической погрешности второго порядка (замеченную в натурном эксперименте при DI10, рис. 9) уровень среднеквадратичной ошибки измерения (RMS) не будет превышать 30–50 нм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao, Hang & Xie, Yijun & Zhu, Renlong & Dong, Zhengqiong & Wang, Xuanze & Liu, Shiyuan & Zhu, Jinlong. (2025). Robust vertical scanning interferometry at a long coherence length. Optics and Lasers in Engineering. 186. 108769. 10.1016/j.optlaseng.2024.108769.

2. Sysoev Evgeny, Kulikov Rodion, Vykhristyuk Ignat, Chugui Yuri Correction of Scanning Steps to Improve Accuracy in Interferometric Profilometer // Measurement Science Review. – 2015. – V. 15. – N. 1. – Pp. 9–12.
3. Сысоев Е.В., Голубев И.В., Чугуй Ю.В., Шахматов В.А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. – 2004. – Т. 40. – № 5. – С. 4–13.
4. Th. Dresel, G. Häusler, H. Venzke Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // Applied Optics. – 1992. – V. 31. – Issue 7. – Pp. 919–925.
5. Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Сысоев Е.В. Исследование неравномерности сканирования в оптическом интерференционном микроскопе // Автометрия. – 2024. – Т. 60. – № 4. – С. 101–108.
6. Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Поташников А.К., Разум В.А., Степнов Л.М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46. – № 2. – С. 119−128.
7. Fleischer Matthias, Windecker Robert, Tiziani Hans J Theoretical Limits of Scanning White-Light Interferometry Signal Evaluation Algorithms // Applied Optics. – 2001. – V. 40. – Issue 17. – Pp. 2815–2820.
8. Сысоев Е.В., Поташников А.К. Адаптивная пороговая обработка дифференциальных интерферограмм // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 1. – С. 20–25.

© И. А. Выхристюк, С. Д. Жданов, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев, 2025

УДК 623.455.2/004.93'12
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-61-68

И. А. Выхристюк[1]✉

Алгоритм контроля внешнего вида гильз с использованием искусственных нейронных сетей

[1]Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: I_Vykhristyuk@mail.ru

Аннотация. Описан алгоритм контроля внешнего вида гильз, позволяющий автоматизировать промежуточную операцию контроля при производстве боеприпасов. Приведены структуры искусственных нейронных сетей, используемых при контроле. Представлены результаты оценки качества работы алгоритма.

Ключевые слова: автоматический контроль, контроль качества продукции, искусственные нейронные сети

I. A. Vykhristyuk[1]✉

Algorithm for controlling the appearance of cartridge cases using artificial neural networks

[1]Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: I_Vykhristyuk@mail.ru

Abstract. The article describes an algorithm for controlling the appearance of cartridge cases, which allows automating the intermediate control operation during ammunition production. The structures of artificial neural networks used in the control are given. The results of assessing the quality of the algorithm's operation are presented.

Keywords: automatic quality control, artificial neural network

Введение

Элементы патронов на разных стадиях их производства подвергаются тщательному визуальному осмотру [1]. В особенности это касается гильз, так как нарушение их целостности во время стрельбы может приводить к выходу из строя оружия, а также представлять угрозу для стрелка. В настоящее время на всех отечественных предприятиях контроль гильз осуществляется визуально контролерами ОТК [2].

Ввиду большого разнообразия встречающихся дефектов и типоразмеров изделий, автоматизация этого технологического процесса представляет собой сложную научно-техническую задачу, для решения которой хорошо подходят бурно развивающиеся в настоящее время технологии искусственного интеллекта [3–5].

В представленной работе описан алгоритм контроля внешнего вида гильз, включающий поиск и нумерацию гильз в кадре, отслеживание перемещения

гильзы до выхода из зоны контроля, обнаружение дефектов на поверхности гильз, контроль наличия и размеров запальных отверстий, принятие решения о разбраковке. Описана структура используемых искусственных нейронных сетей (далее – ИНС), Описан процесс обучения. Приведены результаты работы алгоритма на более чем сотне тысяч изделий.

Автоматизация контроля внешнего вида гильз

При контроле внешнего вида оператор осматривает гильзы в потоке. Гильзы одинаково ориентированы и движутся, вращаясь на боковой поверхности. Осмотр внутреннего состояния и тыльной стороны фланца осуществляется при помощи зеркал. Бракованная продукция вручную извлекается из потока и отбрасывается в накопитель.

Для автоматизации контроля на место осмотра был установлен бокс (рис. 1) с видеокамерой, осветителем, системой оптических зеркал, а также электронным блоком для синхронизации с системой подачи гильз и устройством разбраковки.

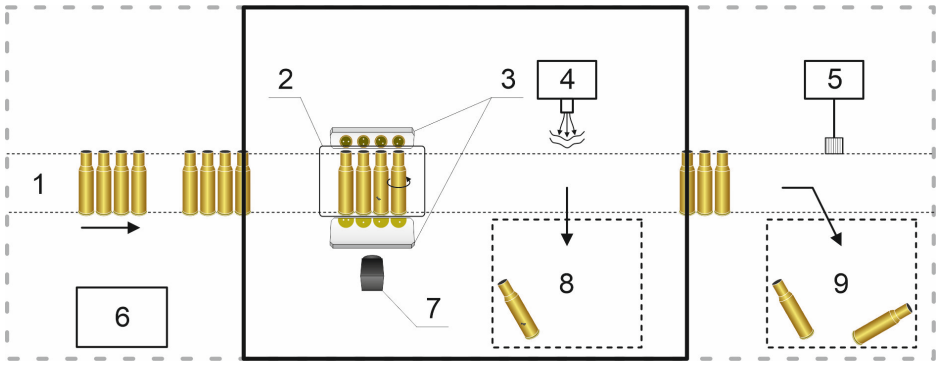
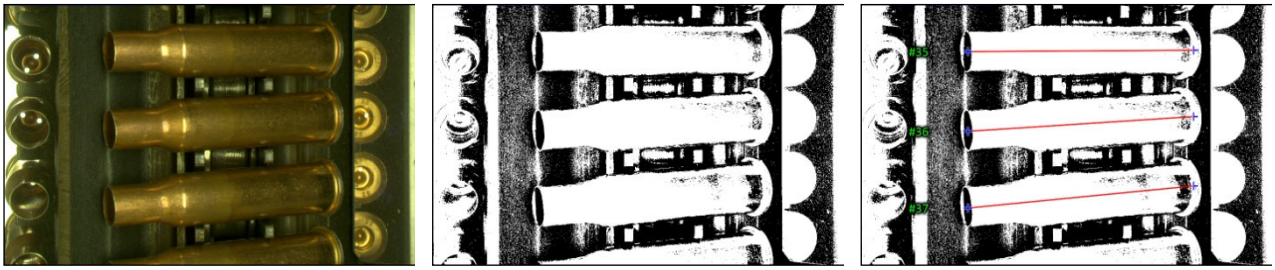


Рис. 1. Схематичное изображение системы контроля внешнего вида гильз: 1 – транспортная система, 2 – блок контроллера и осветителя, 3 – оптические зеркала, 4 – устройство извлечения бракованных гильз, 5 – датчик перемещения транспортной системы, 6 – компьютер, 7 – видеокамера, 8 и 9 – бункеры для бракованной и годной продукции, соответственно

При продвижении транспортной системы на определенное расстояние производится вспышка осветителя и синхронная регистрация кадра видеокамеры. Кадр принимается и обрабатывается управляющим программным обеспечением.

Поиск и нумерация гильз в кадре

Обнаружение гильз в кадре начинается с пороговых алгоритмов (рис. 2, 3). Вначале в красном канале кадра по отражениям фланца в зеркале обнаруживаются центры окружностей по высоте $y_{оф}$. Для этого в определенной колонке $x_{оф}$ красного канала кадра ищутся области сплошного превышения порога $П_ф$. Если размер области лежит в допустимых пределах, за $y_{оф}$ принимается середина области.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Обнаружение гильз по фланцу и дульному отверстию: *а* – исходное изображение, *б* – красный канал с пороговой $П_ф$ бинаризацией, *в* – красный канал с наложенной информацией о гильзах

Далее, в зависимости от величины $y_{оф}$, определяется положение фланца в кадре $y_ф$ в определенной колонке $x_ф$. Для этого используется координата, в которой середина отражения фланца равна середине фланца, и линейное преобразование.

В ходе эксплуатации системы контроля выявлены проблемы с запылением зеркал и расфокусировкой оптической системы, что приводило к неточному определению положения гильз или вообще к их пропуску. В результате доработок алгоритма обнаружения был введен автоматический поиск порога $П_ф$ и уточнение положения фланца гильзы ($x_ф$, $y_ф$) при помощи ИНС.

По $y_ф$ и номеру кадра N можно вычислить расстояние $L(y_ф)$ от условного нуля транспортной системы до гильзы:

$$L(y) = N\,L_к + (y - Y + 1)\,L_п, \qquad (1)$$

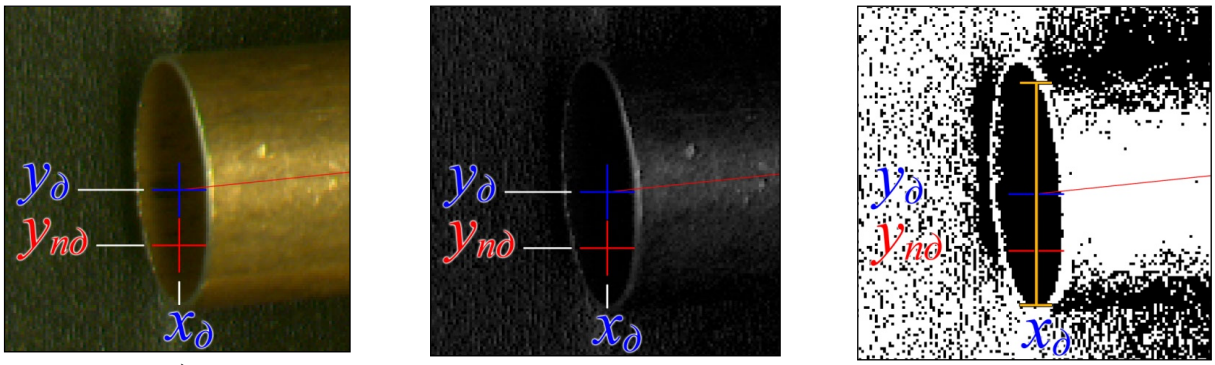
где Lк – величина сдвига транспортной ленты между кадрами, Y – высота кадра в пикселях, Lп – размер области в зоне контроля, проецируемой на 1 пиксель. Из-за особенностей оптической схемы масштаб в кадре не однороден, но при наблюдении за вертикальной координатой в одном столбце кадра можно получить достаточное по точности приближение.

Из (1) видно, что условный ноль соответствует области транспортной системы, отображаемой на нижней границе первого кадра, т.е. при $y = Y - 1$ и $N = 0$.

Если в списке контролируемых гильз есть такая, расстояние до которой отличается от L не более чем на 0,25 $L_к$, то дальнейший контроль привязывается к ней, иначе считается, что появилась новая гильза и информация о ней добавляется в список.

В зависимости от величины $y_ф$ определяется предварительное положение дульного отверстия в кадре $y_{пд}$ (рис. 3). Обнаружение центра дульного отверстия $y_д$ производится путем поиска верней и нижней (относительно $y_{пд}$) границы области сплошного не превышения порога $П_д$ в колонке $x_д$ синего канала кадра (рис. 3, в). Если поиск относительно $y_{пд}$ результатов не дал, то производится по-

пытка поиска со сдвигом вверх ($y_{пд} - \Delta$) и вниз ($y_{пд} + \Delta$) до первого удачного результата.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Обнаружение дульного отверстия (фрагмент изображения с наложенной информацией): *а* – исходное изображение, *б* – синий канал, *в* – синий канал с пороговой $П_д$ бинаризацией

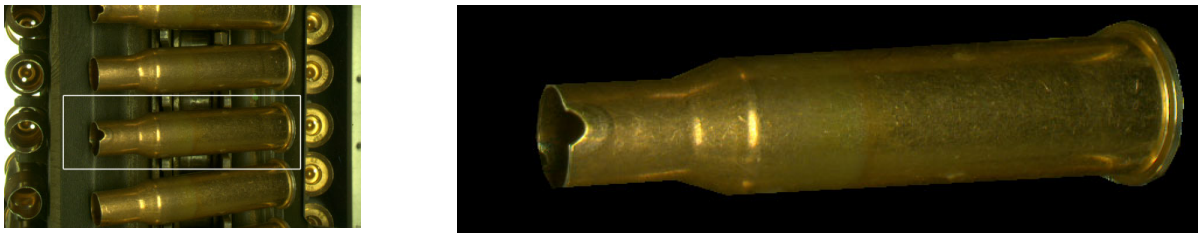
Результат считается удачным, если расстояние от верхней до нижней границы лежит в допустимом интервале. За центр дульного отверстия в кадре $y_д$ принимается середина между верхней и нижней границей. Если поиск $y_д$ завершился неудачей, считается, что для обнаруженной гильзы в текущем кадре есть проблема с обнаружением дульца. Все дальнейшие операции по проверке параметров качества в этом кадре для данной гильзы не производятся.

На рис. 2, в синими крестиками, соединенными красными линиями, отмечены точки ($x_д$, $y_д$) слева и ($x_ф$, $y_ф$) справа.

Обнаружение дефектов

После обнаружения всех гильз в кадре производится поиск дефектов. Для этого вначале гильза выделяется из кадра в отдельное изображение и оконтуривается (рис. 4). Это нужно для упрощения задачи для нейросети. Фон анализировать незачем, а на фоне бывают очень контрастные и яркие структуры.

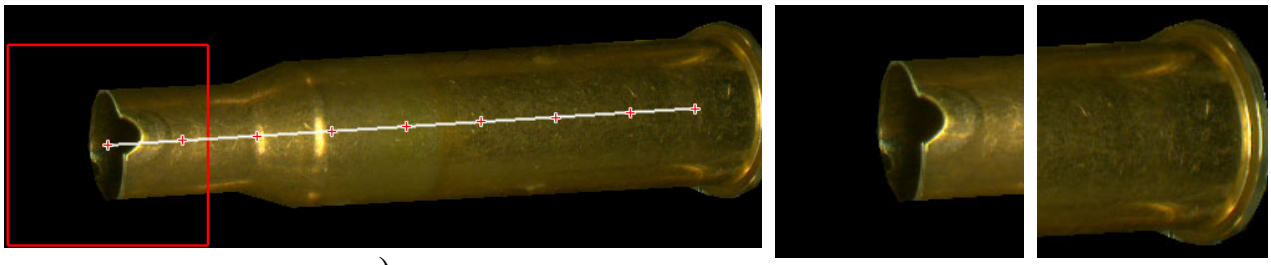
После оконтуривания внешняя часть изображения закрашивается черным (рис. 4, б) и производится помещение данных в видеопамять для дальнейшего использования на входе нейросети.



а) *б*)

Рис. 4. Выделение гильзы из кадра: *а* – кадр с наложенной рамкой для одной из гильз, *б* – изображение гильзы без фона

На вход нейросети подаются фрагменты изображения размером 159 × 159 пикселей (рис. 5, б, в). Центр первого фрагмента соответствует центру дульца ($x_д$, $y_д$), затем центр перемещается вдоль линии до фланца ($x_ф$, $y_ф$) с шагом ~60 пикселей (рис. 5, а). Последний фрагмент центрируется на точку ($x_ф$, $y_ф$).



а) *б*) *в*)

Рис. 5. Схема обнаружения дефектов: *а* – изображение гильзы с наложенной линией сканирования, центрами фрагментов и контуром первого фрагмента, *б* – первый и *в* – последний фрагменты, подаваемые на вход нейросети

Каждый фрагмент классифицируется нейросетью и наиболее вероятный класс (ответ нейросети это вектор «вероятностей» соответствия каждому классу) берется, как результат классификации. Если номер класса K отличается от 0, что соответствует классу «не дефект», то данные о контроле гильзы пополняются информацией о том, что в текущем кадре в соответствующей позиции (центр фрагмента) обнаружен дефект класса K.

Структура искусственных нейронных сетей

Используемые в работе ИНС представляют собой неглубокие сверточные сети, структура которых приведена в табл. 1. Входом обеих нейросетей является нормированное (1 – максимум яркости, 0 – минимум) трехканальное (RGB) изображение.

Свертки описываются размером ядра ($A \times B$ @ C), где $A \times B$ – пространственный (x, y) размер в карте признаков предыдущего слоя, C – количество признаков текущего слоя; шагом (stride) применения ядра ([D, E]) по (x, y), соответственно, в карте признаков предыдущего слоя и функцией активации (ReLU – функция, равная аргументу, если аргумент положительный, и 0 в остальных случаях).

Слои понижения размера (пулинг – max pooling) выбирают максимальное значение в области 2 × 2 с шагом [2, 2] для каждого признака, снижая, таким образом, размер по x и y в два раза.

Выход полносвязного слоя классификатора проходит через SoftMax, что дает нам сумму компонентов выходного вектора равной 1 и все компоненты от 0 до 1. Выход ИНС №2 не изменяется.

Таблица 1

Структура неглубоких сверточных сетей

ИНС №1 (Классификация)	ИНС №2 (Коррекция положения)
Вход (159 × 159 @ 3)	Вход (159 × 159 @ 3)
Свертка (5 × 5 @ 60, [2, 2], ReLU)	Свертка (3 × 3 @ 10, [2, 2], ReLU)
Пулинг (2, 2)	Свертка (3 × 3 @ 15, [2, 2], ReLU)
Свертка (5 × 5 @ 60, [2, 2], ReLU)	Свертка (3 × 3 @ 20, [2, 2], ReLU)
Пулинг (2, 2)	Свертка (3 × 3 @ 25, [2, 2], ReLU)
Свертка (3 × 3 @ 60, [2, 2], ReLU)	Свертка (3 × 3 @ 30, [2, 2], ReLU)
Полносвязный (960 × 1024, ReLU)	Полносвязный (480 × 256, ReLU)
Полносвязный (1024 × 19, SoftMax)	Полносвязный (256 × 2, Id)
Объем обучаемых данных: 4,31 Мб	Объем обучаемых данных: 2,42 Мб

Сеть, применяющаяся для поиска дефектов, представляет собой классификатор на 19 классов.

Для уточнения положения гильзы в кадре используется вторая сеть, выход которой интерпретируется, как коррекция положения фланца по двум осям, нормированная на размер изображения. После получения пороговым алгоритмом $(x_ф, y_ф)$ из кадра вырезается фрагмент 159 × 159 пикселей с центром в этой точке и подается на вход ИНС №2. Полученный ответ (dx, dy) используется для коррекции координат фланца:

$$(x_ф, y_ф) := (x_ф, y_ф) + 159 \cdot (dx, dy)$$

Для обучения нейросети №1 используется 36 тысяч размеченных кадров, общим объемом 77 Гб. В процессе автоматической обработки обучающее множество конвертируется в набор из 226 тысяч позиций, размеченных в 82 тысячах изображений гильз без фона, общим объемом 39 Гб.

Для обучения нейросети №2 используется подмножество из 139 кадров с размеченными 272 позициями.

Правила разбраковки

Решение о разбраковке гильзы принимается при ее выходе из области контроля, т.е. когда ее координата L превышает координату верхнего края текущего кадра (1). Гильза отправляется в брак в следующих случаях:

1) возникали проблемы с обнаружением гильзы (количество обнаружений дульца за время прохода гильзы меньше требуемого). Это происходит при сильных повреждениях гильзы или из-за неправильной укладки гильзы на транспортную ленту;

2) не было обнаружения двух запальных отверстий правильной формы. Запальные отверстия обнаруживаются пороговыми методами в левой части кадра (см. рис. 2, а), затем анализируется их размер и форма;

3) количество обнаружений дефектов одного типа на гильзе превышает заданное значение;

4) количество обнаружений дефектов любого типа на гильзе превышает заданное значение.

Обнаружение дефектов на гильзах – задача нетривиальная. Поверхность гильз бывает разного качества и оттенка. Некоторые дефекты видны только под определенным углом, поэтому учет одинарного обнаружения дефекта на гильзе приводит к высокому уровню перебраковки. При количестве кадров, за которое гильза проходит зону осмотра, примерно равном 20, количество обнаружений дефектов, требуемое для уверенной браковки, равно 2–3 (в зависимости от типа дефекта).

Результаты работы алгоритма

В процессе опытной эксплуатации регулярно проводился автоматический контроль партии продукции объемом несколько десятков тысяч. Результат автоматического контроля тщательно перепроверялся сотрудниками технического контроля. Результаты четырех проверок (в общей сложности 156 тыс. гильз) приведены в табл. 2 и на рис. 6.

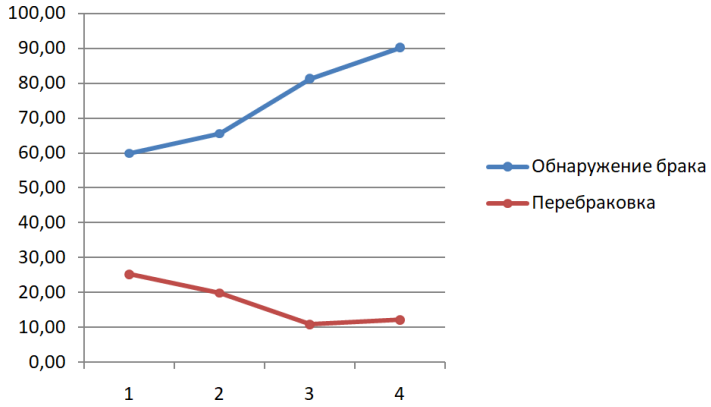


Рис. 6. График изменения качества автоматического контроля

Таблица 2

Результаты проверок

Номер контроля	1	2	3	4
Обнаружение брака (%)	59,9	65,5	81,3	90,2
Перебраковка (%)	25,3	19,9	10,9	12,2

Заключение

Представлен алгоритм контроля внешнего вида гильз, использующий нейросетевые технологии. Описаны правила автоматического контроля внешнего вида гильз, приведены структуры нейросетей.

Приведены результаты оценки качества работы алгоритма, показывающие, что требуемый уровень выявления брака в 95% еще не достигнут, но тенденция роста этого параметра позволяет надеяться на скорое достижение этой планки.

При уровне выявления брака 90% качество автоматического контроля превышает качество штатного (ручного) контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология патронно-гильзового производства / А. Р. Сафарянц // ЦНИИ информации. – 1975. – С. 10, 198–203.

2. Технология производства патронов стрелкового оружия, Ч. 3. Обработка резанием, термическая и химическая обработка, сборка. Проектирование технологических процессов / Н.П. Агеев, Г.А. Данилин, В.П. Огородников // Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. – 2006. – С. 141–144.

3. Object Detection in Aerial Images Using a Multiscale Keypoint Detection Network / J. Su, J. Liao, D. Gu [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 14. – P. 1389–1398. – DOI 10.1109/jstars.2020.3044733.

4. An efficient intrusion detection technique based on support vector machine and improved binary gravitational search algorithm / M. R. Gauthama Raman, N. Somu, S. Jagarapu [et al.] // Artificial Intelligence Review. – 2020. – Vol. 53, No. 5. – P. 3255–3286. – DOI 10.1007/s10462-019-09762-z.

5. An Artificial Intelligence-Based Pick-and-Place Process Control for Quality Enhancement in Surface Mount Technology / J. He, Yu. Cen, Sh. Alelaumi, D. Won // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 12, No. 10. – P. 1702–1711. – DOI 10.1109/tcpmt.2022.3215109.

© И. А. Выхристюк, 2025

УДК 535.317.9
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-69-78

И. Г. Пальчикова[1]✉, Е. С. Смирнов[1]

Линза с увеличенной глубиной фокуса

[1]Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: palchikova@gmail.com

Аннотация. В офтальмологии при лечении катаракты востребованы интраокулярные линзы, формирующие на сетчатке глаза четкое изображение предметов, находящихся на различных расстояниях. Такие свойства приобретает линза, обладающая увеличенной глубиной фокуса (EDOF). В работе предлагается и рассматривается метод расчета фазовой функции пропускания EDOF-линзы. Фазовые функции пропускания трех EDOF-линз найдены. Результаты экспериментального исследования каустики зонной пластинки EDOF подтверждают возможность расчетов по предлагаемой методике.

Ключевые слова: каустика, EDOF-линза, сферическая аберрация, зонная пластинка

I. G. Palchikova[1]✉, E. S. Smirnov[1]

Lens with extended depth of focus

[1]Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: palchikova@gmail.com

Abstract. Intraocular lenses are in demand in ophthalmology for cataract treatment; it is forming a clear image of objects on the retina while objects are at different distances. Such properties are acquired by a lens possessing an extended depth of focus (EDOF). In this paper, a method for calculating the phase transmittance function of an EDOF lens is proposed and discussed. The phase functions for 3 types EDOF lenses are determined. The results of experimental study of the caustics of the EDOF zone plate confirm the possibility of calculations according to the proposed method.

Keywords: caustics, EDOF lens, spherical aberration, zone plate

Введение

Распределение интенсивности света в фокальной плоскости хорошо корректированного объектива определяется дифракцией на его выходном зрачке [1]. Продольный и поперечный размеры каустики вблизи фокуса жестко связаны: чем меньше размер пятна в геометрической фокальной плоскости, тем меньше глубина фокуса. В последние годы не ослабевает интерес к оптическим системам с увеличенной глубиной фокуса, в частности, к фокусировке излучения аксиконами [2–4]. Аксиконная фокусировка находит широкое применение в устройствах ультразвуковой диагностики, работающих по принципу запрос-ответ (или сигнал-эхо), в которых необходимо обеспечить усиление интенсивности ультразвуковой волны вдоль протяженного отрезка оптической оси [5–9]. Вместе с тем существует потребность в разработке интраокулярных

линз (ИОЛ) с увеличенной глубиной фокуса (extended depth of focus intraocular lenses – EDOF IOL), которые позволяют в отсутствие аккомодации формировать на сетчатке глаза четкое изображение предметов, находящихся на различных расстояниях. Широко обсуждается возможность применения оптических элементов, формирующих торические волновые фронты (к которым относятся и аксиконы), в конструкции EDOF IOL [10,11].

Однако, одной из особенностей [12] аксиконной фокусировки является слабая концентрация энергии в любом поперечном сечении фокального отрезка по сравнению с классической линзовой фокусировкой, что приводит к резкому падению контраста в изображении. И, кроме того, существенная пространственная вариантность оптических систем, содержащих аксиконы [12] и предназначенных для построения изображений, приводит к появлению нежелательных артефактов у пациентов после имплантации некоторых типов IOL, включая EDOF IOL [13–15].

В настоящей работе обосновывается метод расчета, и находится фазовая функция пропускания модифицированной линзы с увеличенной глубиной фокуса, определяется дифракционная структура зонной пластинки, реализующей эту фазовую функцию, и приводятся результаты экспериментального исследования каустики этой зонной пластинки (ЗП).

Расчет фазовой функции пропускания

Расчет фазовой функции пропускания модифицированной линзы будем проводить в скалярном приближении Френеля согласно подходу, развитому в [16, 17]. Ход лучей и принятые обозначения показаны на рис. 1.

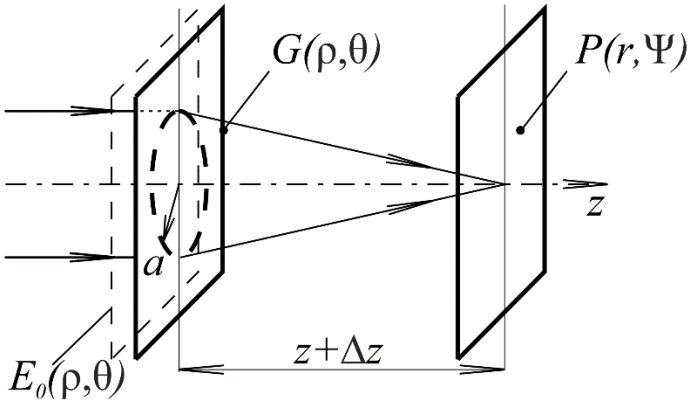


Рис. 1. Иллюстрация хода лучей и принятых обозначений

Будем считать, что падающий волновой фронт является плоским, и амплитуда $E_0(\rho)$ падающей волны не зависит от угловой координаты. Тонкий оптический элемент с фазовой функцией пропускания $\varphi(\rho)$ расположен в плоскости G и фокусирует падающий волновой фронт в каустику вдоль оптической оси (фокальный отрезок).

Амплитуда поля $E(r,\psi,z)$ в произвольной точке на оси фокального отрезка имеет вид:

$$E(\mathbf{0},z)=\frac{k}{iz}\iint_G E_0(\rho)\exp\left\{ik\left[\sqrt{\rho^2+z^2}+\varphi(\rho)\right]\right\}\rho d\rho \quad , \tag{1}$$

где λ – длина волны излучения; $k=2\pi/\lambda$, (ρ,θ) – координаты в плоскости G; $\varphi(\rho)$ – фазовая функция пропускания оптического элемента (линзы).

Мощность $dw(\rho)$ потока лучистой энергии, которая проходит сквозь любую круговую зону в плоскости выходного зрачка, равна

$$dw(\rho)=2\pi\rho\left|\frac{E_0(\rho)}{E_0(0)}\right|^2 d\rho, \tag{2}$$

где ρ и $\rho+d\rho$ – внутренний и внешний радиусы круговой зоны.

Найдем фазовую функцию пропускания осесимметричного оптического элемента, который будет концентрировать эту мощность в фокальный отрезок на оптической оси между z_1 и z_1+dz. Рефракционная линза концентрирует световой поток в единственную фокальную точку, и удлинение ее каустики возможно выполнить путем введения аберраций. То есть для решения задачи необходимо определить тип вводимых аберраций и вид зависимости, которая связывает радиальную координату в плоскости G и z-координату точек фокального отрезка.

Направление лучей, преломленных оптическим элементом, в приближении малых углов находится с помощью его фазовой функции пропускания $\varphi(\rho)$ следующим образом:

$$d\varphi/d\rho=-\rho/z. \tag{3}$$

Согласно (2) и (3), градиент распределения мощности вдоль фокального отрезка (на его оси) имеет следующий вид:

$$W=\frac{dw(\rho)}{dz}=2\pi\rho\left|\frac{E_0(\rho)}{E_0(0)}\right|^2\left[-\frac{d}{d\rho}\left(\frac{\rho}{d\varphi/d\rho}\right)\right]^{-1}. \tag{4}$$

Фазовая функция пропускания $\varphi(\rho)$ оптического элемента находится путем решения дифференциального уравнения (4), если задан вид градиента мощности $W=\dfrac{dw(\rho)}{dz}$.

Рассмотрим три частных случая распределения мощности вдоль фокального отрезка в следующем приближении. Будем считать, что освещающая волна – плоская, однородная, монохроматическая и имеет единичную амплитуду $\left|\frac{E_0(\rho)}{E_0(0)}\right| = 1$. Из уравнения (4) легко получить выражение для расчета фазовой функции пропускания $\varphi(\rho)$ в следующем приближении $\int \frac{2\pi\rho}{W} \partial\rho << b_0$, где b_0 – постоянная интегрирования, которую мы определим ниже:

$$\varphi(\rho) = \varphi_0 - \frac{1}{b_0}\left[\frac{\rho^2}{2} - \int \rho \partial\rho \left(\frac{2\pi}{b_0}\int \frac{\rho}{W}\partial\rho\right)\right], \tag{5}$$

где φ_0 и b_0 – постоянные интегрирования.

Случай 1. Потребуем постоянство градиента мощности вдоль фокального отрезка:

$$W_1 = \frac{1}{\xi}, \qquad \xi = const. \tag{6}$$

Проведя интегрирование в уравнении (5), находим фазовую функцию пропускания оптического элемента:

$$\varphi_1(\rho) = \varphi_0 - \frac{1}{b_0}\left(\frac{\rho^2}{2} - \frac{\pi\xi\rho^4}{4b_0}\right). \tag{7}$$

Таким образом, условие (6) можно удовлетворить, добавляя сферическую аберрацию (третий член уравнения (7)) к фазовой функции пропускания линзы (второй член уравнения (7)). Искомый оптический элемент представляет из себя модифицированную линзу со сферической аберрацией.

Из выражений (3) и (7) находим соответствие между координатами точек на оси фокального отрезка и радиальной координатой оптического элемента:

$$z_1(\rho) = -\frac{\rho}{d\varphi/d\rho} = \frac{b_0}{1 - \frac{\pi\xi\rho^2}{b_0}} \approx b_0\left(1 + \pi\xi\rho^2/b_0\right). \tag{8}$$

Постоянные ξ и b_0: определяем из граничных условий:

$$\left.\begin{array}{c}\rho = 0,\ \ z_1 = b_0 \\ \rho = a,\ \ z_1 + \Delta z = b_0 + \pi\xi a^2\end{array}\right\}\ \ \xi = \frac{\Delta z}{\pi a^2}, \tag{9}$$

где a – радиус выходного зрачка; $z_1 = b_0$ – фокусное расстояние для параксиальных лучей; Δz – задаваемая геометрооптическая глубина фокуса.

Таким образом, фазовая функция пропускания (7) получена в приближении $\Delta z / z_1 << 1$, что равнозначно требованию малости глубины фокуса по сравнению с базовым фокусным расстоянием.

Распределение интенсивности в изображении при наличии первичной сферической аберрации рассмотрено в работе [1], где показано, что глубина фокуса увеличивается, но функция рассеяния точки может существенно отличаться от кружка Эйри при значительной величине волновой аберрации $\geq 0{,}94\lambda$.

Оценим отношение Штреля i (и, следовательно, уменьшение концентрации энергии в фокальном отрезке по сравнению с идеальной линзой), пользуясь соотношениями, полученными в [1]:

$$i = 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \frac{\left(A'_{040}\right)^2}{90}. \tag{10}$$

В рассматриваемом случае $A'_{040} = \Delta z a^2 / 4 z_1^2$ и

$$i = 1 - \frac{1}{360}\left(\frac{\Delta z a^2 \pi}{z_1^2 \lambda}\right)^2. \tag{11}$$

Как и следовало ожидать, падение плотности энергии растет прямо пропорционально удлинению фокального отрезка $\Delta z / z_1$ и увеличению относительного отверстия a / z_1. Пусть $\Delta z / z_1 \approx 10^{-1}$, $a / z_1 = 1/20$, $a / \lambda = 10^3$, тогда отношение Штреля составит i=0,4.

Случай 2. Градиент мощности вдоль фокального отрезка изменяется как:

$$W_2 = \frac{\rho}{\eta}, \qquad \eta = const. \tag{12}$$

В этом случае фазовая функция пропускания оптического элемента, найденная согласно (5) имеет вид:

$$\varphi_2(\rho) = \varphi_0 - \frac{1}{b_0}\left(\frac{\rho^2}{2} - \frac{2\pi\eta\rho^3}{3b_0}\right). \qquad (13)$$

Фазовая функция пропускания (13) присуща модифицированной линзе с аберрацией типа кома.

Координаты точек на оптической оси соотносятся с радиальными координатами в плоскости зрачка оптического элемента как:

$$z_2(\rho) = -\frac{\rho}{d\varphi/d\rho} = \frac{b_0^2}{b_0 - \pi\eta\rho} \approx b_0\left(1 + \pi\eta\rho/b_0\right). \qquad (14)$$

Постоянные η и b_0 определяем из граничных условий:

$$\left.\begin{array}{c} \rho = 0,\ \ z_2 = b_0 \\ \rho = a,\ \ z_2 + \Delta z = b_0 + 2\pi\eta a \end{array}\right\} \ \eta = \frac{\Delta z}{2\pi a}, \qquad (15)$$

где a – радиус выходного зрачка; b_0 – фокусное расстояние для параксиальных лучей, Δz – задаваемая геометрооптическая глубина фокуса.

Случай 3. Пусть градиент мощности уменьшается вдоль фокального отрезка:

$$W_3 = \frac{1}{\varsigma\rho}, \qquad \varsigma = const \qquad (16)$$

Из (5) находим фазовую функцию пропускания оптического элемента:

$$\varphi_3(\rho) = \varphi_0 - \frac{1}{b_0}\left(\frac{\rho^2}{2} - \frac{2\pi\varsigma\rho^5}{15b_0}\right). \qquad (17)$$

Аналогично случаям 2 и 3, найдена фазовая функция пропускания модифицированной линзы с аберрацией порядка выше третьего.

Координаты точек на оптической оси фокального отрезка можно выразить следующим образом:

$$z_3(\rho) = -\frac{\rho}{d\varphi/d\rho} = \frac{b_0^2}{b_0 - \frac{2\pi\varsigma\rho^3}{3}} \approx b_0\left(1 + \frac{2\pi\varsigma\rho^3}{3b_0}\right). \qquad (18)$$

Постоянные ς и b_0 вновь определяем из граничных условий:

$$\left.\begin{array}{c}\rho = 0,\ \ z_3 = b_0 \\ \rho = a\ \ ,\ \ z_3 + \Delta z = b_0 + 2\pi\varsigma\ \ \dfrac{a^3}{3}\end{array}\right\}\ \varsigma\ = \frac{3\Delta z}{2\pi\ a^3}. \qquad (19)$$

Экспериментальные результаты

Модифицированная линза с фазовой функцией пропускания $\varphi_1(\rho)$ (7) была изготовлена в виде ступенчатой зонной пластинки по технологии фотолитографии [16]. Расчет радиусов зон $\rho_{l,m}$ ЗП был выполнен с помощью обобщенного принципа таутохронизма способом, обсужденным в [16].

В приближении $\Delta z / z << 1$ $\rho_{l,m}$ можно записать как:

$$\rho_{l,m} = (l + m/N)\lambda\sqrt{\frac{2z_1}{(l+m/N)\lambda} + 1 + \frac{4\Delta z z_1}{a^2}} + 2(l+m/N)\lambda\frac{\Delta z}{\pi a^2}. \qquad (20)$$

Первые два члена подкоренного выражения описывают границы ступеней обычной зонной пластинки с киноформным профилем зон, последующие появляются при ненулевых значениях Δz .

Характеристики ЗП с увеличенной глубиной фокуса: фокусное расстояние z_1=100 мм, длина фокального отрезка $\Delta z = 5$ мм, радиус a=10 мм, число ступеней в киноформном профиле N=3.

Измерения диаметра фокального пятна и распределения интенсивности в различных сечениях фокального отрезка, плотности энергии вдоль оптической оси выполнялись в соответствии с общепринятыми рекомендациями, подробно изложенными в [18]. Экспериментальная установка показана на рис. 2.

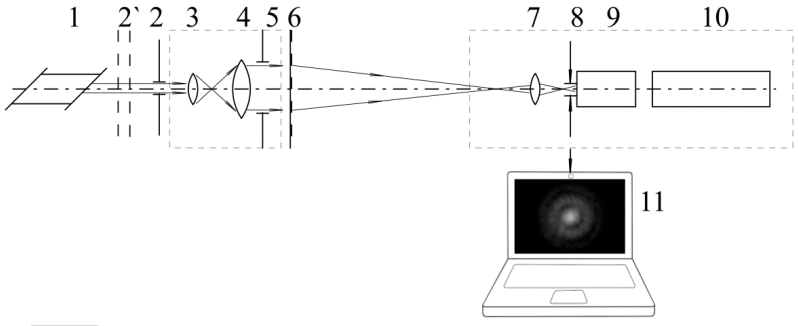


Рис.2. Принципиальная схема экспериментальной установки: одномодовый *He-Ne* лазер – 1; устройство диспекл – 2`; диафрагма – 2; телескоп для расширения и коллимации пучка – объективы 3 и 4; апертурная ирисовая диафрагма – 5; исследуемый оптический элемент – 6; горизонтальный микроскоп с высокоапертурным и безаберрационным микрообъективом – 7; фотоумножитель с диафрагмой – 8, 9; регистрирующее устройство – 10; компьютер – 11

Изображение фокальной точки наблюдается визуально, либо переносится микроскопом в плоскость диафрагмы 8 фотоумножителя (ФЭУ) 9 с увеличением. Сигнал ФЭУ регистрируется самописцем или вольтметром 10. Перемещение микроскопа и ФЭУ с диафрагмой осуществляется микро- метрическими подвижками. На место диафрагмы 8 могла быть помещена фотоматрица камеры *CANON EOS 500D,* связанная с компьютером 11. Результаты измерений, записанные в файл, позволяют количественно измерять яркость и координаты любой точки изображения.

Измерения каустики основного дифракционного порядка изготовленной ЗП проводились одновременно с аналогичными измерениями для объектива с фокусным расстоянием 105 мм и линзы со сферической аберрацией (f_R=105 мм). На рис. 3 приведены экспериментально полученные зависимости диаметра d фокального пятна от z-координаты точек фокального отрезка: вдоль оптической оси объектива (кривая 1), линзы со сферической аберрацией (кривая 2), исследуемой ЗП с $\varphi_1(\rho)$ (кривая 3). Экспериментальные данные подтверждают удлинение каустики ЗП. Однако, не меньший интерес представляет и распределение плотности энергии вдоль каустик, показанное на рис. 4. Кривые 1 и 2 на рис. 4 аппроксимируют экспериментальные данные, полученные с объективом и линзой со сферической аберрацией. Максимум каждой кривой совпадает с фокусом, а плавное спадание наблюдается по обе стороны от фокуса. ЗП демонстрирует удлинение фокального отрезка, как показывает кривая 3. Существенный разброс экспериментальных точек вызван, по-видимому, интерференцией паразитных дифракционных порядков. Распределение интенсивности в поперечных сечениях фокального отрезка на расстояниях в пределах 100 ÷ 101 мм от ЗП совпадает с кружком Эйри, затем боковые лепестки возрастают, достигая 1/6 от максимума, что близко к величине боковых лепестков при аксиконной фокусировке.

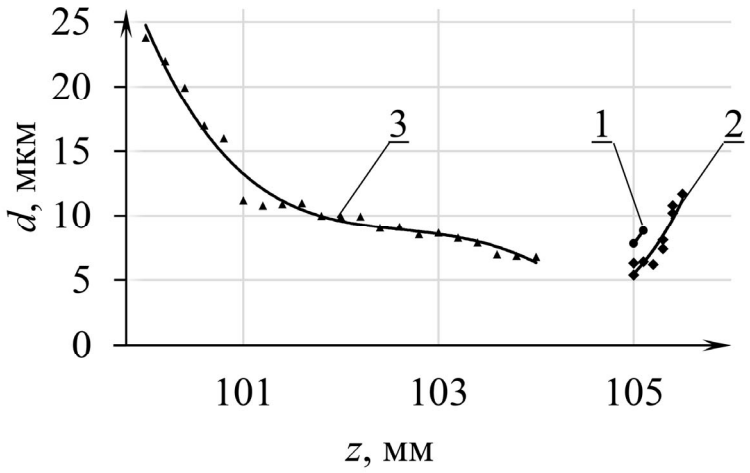


Рис. 3. Изменение диаметра фокального пятна вдоль каустики объектива (кривая 1), линзы со сферической аберрацией (кривая 2), исследуемой ЗП (кривая 3)

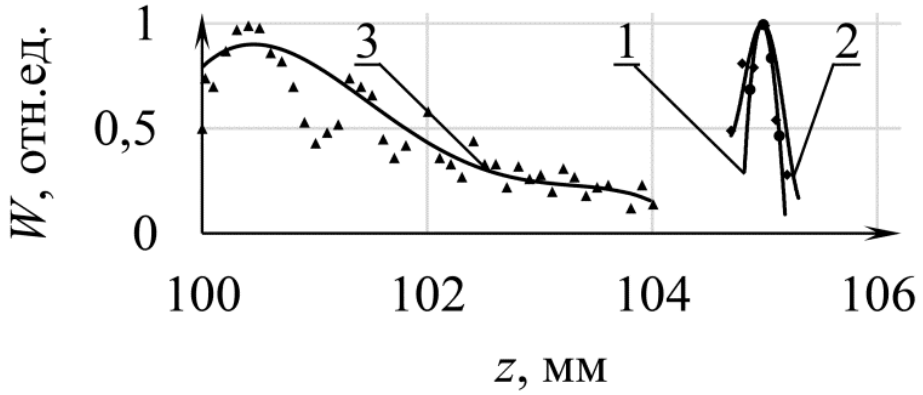


Рис. 4. Распределение энергии вдоль оси фокального отрезка объектива (кривая 1), линзы со сферической аберрацией (кривая 2), исследуемой ЗП (кривая 3)

Обсуждение и выводы

В работе представлен метод расчета фазовой функции пропускания модифицированной линзы, который основывается на задаваемых условиях на распределение мощности излучения вдоль оптической оси каустики. Показано, что формирование каустики заданной глубины достигается путем введения контролируемых аберраций в функцию пропускания линзы, определен тип аберраций, и выполнен расчет фазовых функций пропускания линз для трех видов градиентов мощности.

Линза с увеличенной глубиной фокуса обеспечивает более высокую концентрацию излучения, чем аксикон. В работе [12] проведено сравнение интенсивности в точке параксиального изображения идеальной линзы и на оси фокального отрезка аксикона (аналог числа Штреля), и показано, что отношение интенсивностей составляет $I_{0_axicon} \Big/ I_{0_lens} \sim 6 \cdot 10^{-3}$. То есть при фокусировке излучения аксиконом интенсивность на оси гораздо меньше (в $6 \cdot 10^{-3}$ раз), чем при фокусировке соответствующей сферической линзой. В то время как у линзы с увеличенной глубиной фокуса отношение Штреля составит 0,4. Проведенная оценка качественно описывает явление и показывает, что ЗП со сферической аберрацией обеспечивает примерно в 100 раз более высокую концентрацию излучения в поперечном сечении фокального отрезка, чем аксикон.

Дальнейшие работы предполагают оптимизацию функции пропускания ЗП для использования ее в качестве ИОЛ, расчет каустики в приближении Френеля, изготовление прототипа EDOF IOL и экспериментальное исследование его характеристик.

Благодарности

Финансовая поддержка работы осуществлялась Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00614-24-00).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Хило Н. А., Ропот П. И., Петров П. К., Белый В. Н. Световые пучки бесселева типа, формируемые двухкомпонентной схемой из аксикона и сферической линзы // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2020. Т. 56. № 3. С. 373 – 383. https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-3-373-383.
3. Jaroszewicz Z., Burvall A., Friberg A. Axicon - the Most Important Optical Element // Optics & Photonics News. 2005. Vol. 16(4). P. 34-39. DOI:10.1364/OPN.16.4.000034 .
4. Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Khorin P.A., Butt M.A. Modern Types of Axicons: New Functions and Applications // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 6690. https://doi.org/10.3390/s21196690].
5. Arimoto R., Saloma C., Tanaka T., and Kawata S. Imaging properties of axicon in a scanning optical system // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. P. 6653 – 6657. https://doi.org/10.1364/AO.31.006653.
6. Weijian Tian, Zhihua Ding, Zhengkang Bao, Zukang Lu, and Zhengdong Liu. Beam shaping with component of cone axicons in confocal system // Proc. SPIE 3897. Advanced Photonic Sensors and Applications, (11 November 1999); https://doi.org/10.1117/12.369327.
7. Woehlke R., Brennan B. D., Cooper R. F. Axicons in adaptive optics ophthalmoscopy; observations and utility of Bessel illumination // Investigative Ophthalmology & Visual Science. 2024. Vol.65. Issue 7. P. 1416.
8. S. Nagai , K. Iizuka A practical ultrasound axicon for non-destructive testing // Ultrasonics. 1982. Vol. 20, Is. 6. P. 265 – 270. https://doi.org/10.1016/0041-624X(82)90047-6 .
9. Ruediger Grunwald, Martin Bock Needle beams: a review// Advances in Physics: X. 2020. Vol. 5. Is.1. https://doi.org/10.1080/23746149.2020.1736950.
10. Petelczyc K., Kolodziejczyk A., Blocki N., et al. Model of the light sword intraocular lens: in-vitro comparative studies// Biomedical Optics Express. 2020. Vol. 11, No. 1. P40 – 54. https://doi.org/10.1364/BOE.11.000040.
11. Mikuła G., Jaroszewicz Z., Kolodziejczyk A., Petelczyc K., and Sypek M. Imaging with extended focal depth by means of lenses with radial and angular modulation // Opt. Express. 2007. Vol. 15. P. 9184 – 9193 . https://doi.org/10.1364/OE.15.009184.
12. Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. Анализ построения изображений оптическими системами, содержащими аксиконы, в рамках теории линейных систем// Автометрия. 2025. Т.61. №2. DOI: 10.15372/AUT20250200.
13. Dermot McGrath: Evaluating the EDOF Effect// ESCRS. 2024. ESCRS - Evaluating the EDOF Effect Epub.
14. Packer M. Multifocal intraocular lens technology: biomaterial, optical design and review of clinical outcomes // Expert Rev. Ophthalmol. 2011. Vol. 6. N 4. P. 437 – 412.
15. Kohnen T. Bohm M., Hemkeppler E., Schönbrunn S., Delorenzo D., Petermann K., Herzog M. Visual performance of an extended depth of focus intraocular lens for treatment selection // Eye (Lond). 2019. Vol.33(10). P. 1556 – 1563. doi: 10.1038/s41433-019-0443-x. Epub
16. Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Михальцова И.А. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение // Автометрия. 1985. №1. С. 4 – 24.
17. Пальчикова И.Г. Киноформные оптические элементы с увеличенной глубиной фокуса // Сб. Компьютерная оптика. Под ред. ак. Е.П Велихова, ак. А.М Прохорова. М.: НЦНТИ 1989. Вып. 6. С. 9 – 19.
18. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. - М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

© И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов, 2025

УДК 532.8
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-79-87

И. К. Кабардин[1]✉, М. Р. Гордиенко[1], А. Д. Ротарь[1], В. Г. Главный[1]

Применение метода солевой метки для изучения многофазной гидродинамики

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривается развитие многоточечного электро-импедансного метода диагностики многофазных потоков. Основная цель исследования заключается в исследовании восприимчивости и разрешающей способности метода при изучении фазовых распределений в жидкостно-газовых системах. Предложен подход, основанный на использовании датчиков и алгоритмов обработки данных, обеспечивающих высокую чувствительность к изменениям электропроводности среды. Экспериментальная часть включает в себя изучение влияния единичных фазовых включений на измерительные параметры, что позволило уточнить характеристики метода в условиях локального изменения фазового состава. Полученные результаты демонстрируют эффективность подхода для определения структурных характеристик потоков и их динамических параметров. Практическая значимость работы заключается в применении метода для мониторинга и оптимизации промышленных процессов, где требуется высокая точная диагностика фазового состава.

Ключевые слова: многоточечный метод, многофазные потоки, контроль фазового состава, фазовые распределения, жидкостно-газовые системы, электропроводность среды

I. K. Kabardin[1]✉, M. R. Gordienko[1], A. D. Rotar[1], V. G. Glavny[1]

Application of the salt label method to study multiphase hydrodynamics

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. This paper discusses the development of a multipoint electrical impedance method for diagnosing multiphase flows. The main objective of the study is to investigate the susceptibility and resolution of the method when studying phase distributions in liquid-gas systems. An approach is proposed based on the use of sensors and data processing algorithms that provide high sensitivity to changes in the electrical conductivity of the medium. The experimental part includes a study of the effect of single phase inclusions on the measurement parameters, which made it possible to clarify the characteristics of the method under conditions of local changes in the phase composition. The results obtained demonstrate the effectiveness of the approach for determining the structural characteristics of flows and their dynamic parameters. The practical significance of the work lies in the application of the method for monitoring and optimizing industrial processes where highly accurate diagnostics of the phase composition is required.

Keywords: multipoint method, multiphase flows, phase composition control, phase distributions, liquid-gas systems, electrical conductivity of the medium

Введение

Данная работа посвящена развитию многоточечного электро-импедансного метода диагностики многофазных потоков. Современные методы измерений, из-

меряющие электро-импеданс, активно применяются для мониторинга различных процессов, включая исследования многофазных потоков в жидкостно-газовых системах. Однако точность и разрешающая способность традиционных методов диагностики часто не позволяют детально анализировать фазовые переходы и динамику в таких средах. В связи с этим исследование новых подходов и совершенствование существующих методов является актуальной задачей.

Электро-импедансный метод основан на измерении изменения электропроводности среды при наличии различных фаз, таких как жидкость или газ, что позволяет получать информацию о фазовом составе и распределении этих фаз в реальном времени.

Целью работы является экспериментальное исследование двух датчиков с различным количеством каналов и различной формы.

Задачами являлись выявление зависимости показаний датчиков от характеристик фазовых включений в исследуемых средах и оценка их применимости в реальных условиях.

Решение этих задач направлено на расширение возможностей метода и его практическое применение для контроля фазового состава и динамики многофазных потоков в различных промышленных процессах.

Описание метода

Для исследования многофазных потоков используется электро-импедансный метод диагностики. Его суть состоит в том, что при пропускании переменного тока через исследуемую среду изменяется ее проводимость в зависимости от физических и химических свойств составляющих фаз. Измеряя изменения проводимости в различных точках потока, можно судить о концентрации и распределении этих фаз [1–2].

Для исследования фаз могут быть использованы электро-импедансные датчики – это устройства, которые измеряют сопротивление или проводимость между двумя или несколькими электродами, погруженными в исследуемую среду. Основный принцип измерения состоит в том, что на один из электродов подается переменный ток, электроды, расположенные на другом конце, принимают ток, прошедший через среду, измеряется импеданс, который зависит от состава среды и ее характеристик, таких как проводимость фаз.

Изменения проводимости обусловлены физическими характеристиками фаз, их взаимодействием и распределением. Основой метода является регистрация комплексного импеданса Z, который определяется как:

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C}, \tag{1}$$

где R – активное сопротивление, C — электрическая емкость, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота сигнала. Многоточечные датчики обеспечивают возможность пространственно-временного анализа параметров потока. Каждый канал таких датчиков фиксирует локальные изменения импеданса, связанные с изменением

проводимости среды, вызванным, например, попаданием пузырьков воздуха или изменением концентрации маркера.

Воздушные пузырьки, проходя через зону измерения, снижают проводимость из-за своей низкой электрической проводимости. Это вызывает увеличение сопротивления *R*. Влияние концентрации растворов на параметры импеданса изучалось с использованием водных растворов NaCl различной концентрации. Полученные данные о сопротивлении преобразовывались в графики концентраций маркера для каждого момента времени, что позволяло анализировать пространственно-временные изменения в потоке.

Экспериментальная часть

Изучалось изменение проводимости среды с использованием цилиндрического многоточечного электро-импедансного датчика (рис. 1) с 8 активными каналами. Датчик имел 4 опорных канала (на рис. 1а они находятся в пределах малой окружности), 8 регистрационных (на рис. 1а они находятся между малой окружностью и обкладкой датчика) и 4 пустых. Опорные каналы реализованы для возможности определения начала очередной последовательности опроса каналов. Эксперимент проводился для оценки восприимчивости датчика.



а) б)

Рис.1. Схема цилиндрического датчика

Датчик погружался в дистиллированную воду. Для каждого из каналов последовательно создавались возмущения в виде подачи воздушных пузырьков с помощью шприца. Воздушные пузырьки подносились непосредственно к каждому из каналов, вызывая локальное изменение проводимости среды. На осциллографе фиксировались изменения напряжения, соответствующие реакции датчика на снижение проводимости, вызванное низкой проводимостью воздуха. Исследование проводилось с использованием осциллографа Rigol DS1054, имеющего частоту дискретизации 1 ГГц. Датчик был подключен к осциллографу, который фиксировал сигналы с каждого из каналов (рис. 2).

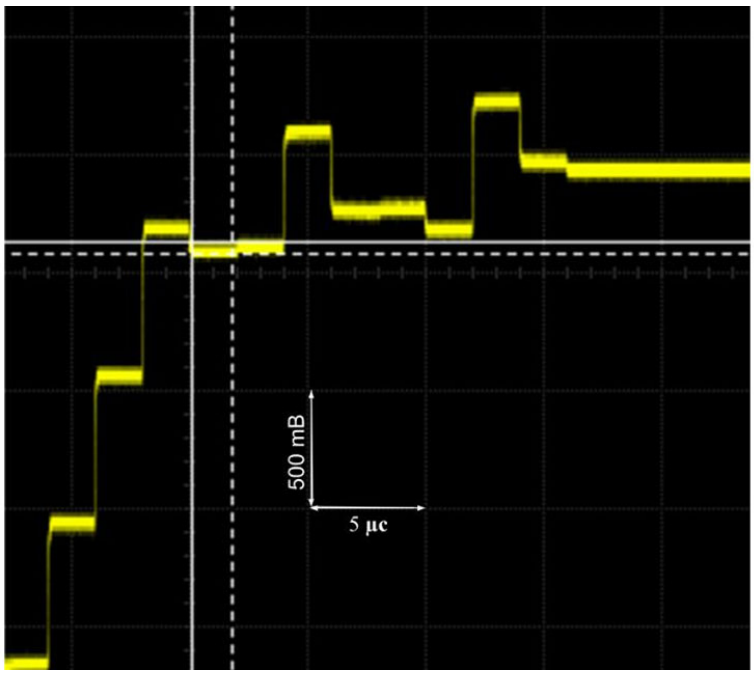


Рис. 2. Характерная осциллограмма сигнала

На осциллограммах рис. 3 и рис. 4 показано изменение амплитуды сигнала при поднесении пузырька воздуха к регистрирующему каналу 6. Для дальнейшего анализа была составлена таблица (табл. 1), в которой фиксируются изменения амплитуды напряжения для каждого из восьми каналов.

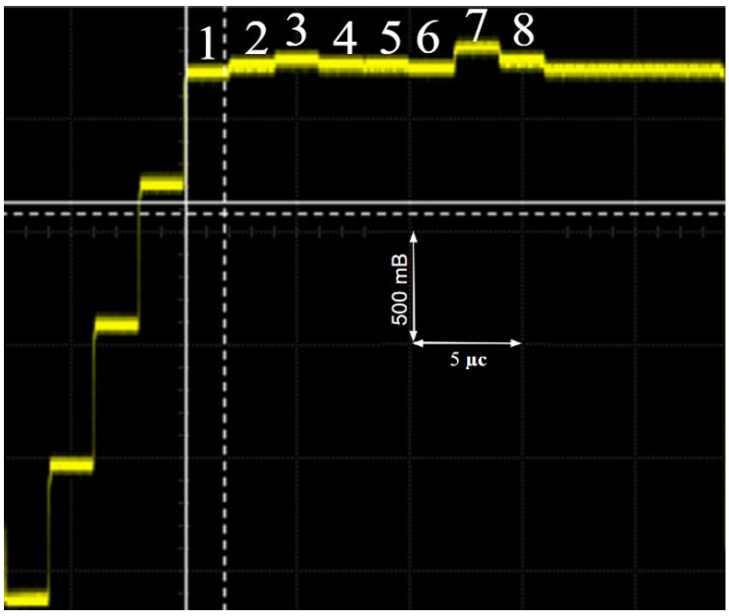


Рис.3. Сигнал в дистиллированной воде

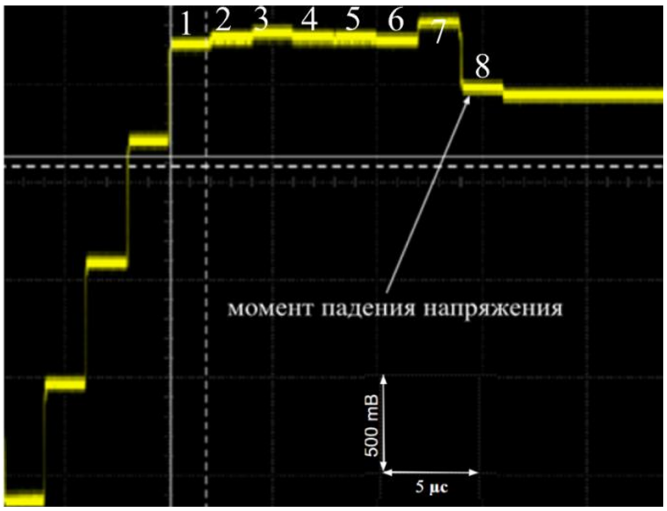


Рис.4. Сигнал после поднесения к каналу 6 пузырька с воздухом

Таблица 1

Амплитудные изменения сигнала на каждом канале

Номер канала	Амплитуда сигнала до пузырька, В	Амплитуда сигнала после пузырька, В	Изменение амплитуды, В
Канал 1	0,7	0,3	0,4
Канал 2	0,7	0,4	0,3
Канал 3	0,75	0,6	0,15
Канал 4	0,7	0,5	0,2
Канал 5	0,7	0,3	0,4
Канал 6	0,7	0,3	0,4
Канал 7	0,8	0,8	0,0
Канал 8	0,7	0,5	0,2

При поднесении пузырька воздуха к поверхности каналов датчика происходит значительное снижение амплитуды сигнала на большинстве регистрирующих каналов. Наиболее чувствительными оказались каналы 1, 5 и 6, где наблюдались максимальные изменения амплитуды. Из табл. 1 видно, что в канале 7 нет изменения амплитуды, из этого можно сделать вывод, что он неисправен и, в связи с этим, исключить его из дальнейшего исследования.

При погружении датчика в дистиллированную воду (рис.3) сигнал характеризуется четкой прямоугольной формой с относительно стабильными уровнями напряжения. Частота сигнала составляет около 31,256 кГц, а амплитуда достигает 1,77 В. Это указывает на низкую проводимость среды, что характерно для дистиллированной воды.

В случае погружения датчика в 8% раствор соли NaCl (рис. 5) амплитуда снижается до 1,39 В. Это демонстрирует существенное влияние высокой концентрации ионов на электрические свойства раствора. Увеличение частоты сигналов свидетельствует о возрастании проводимости раствора, что приводит к измене-

нию реактивных характеристик цепи. Однако, наблюдается снижение резкости фронтов сигнала, что, вероятно, связано с взаимодействием электродов датчика с ионным раствором и появлением нелинейных эффектов. С растворами солей 16% и 24% амплитуда сигнала падает до 796 мВ и 777 мВ соответственно.

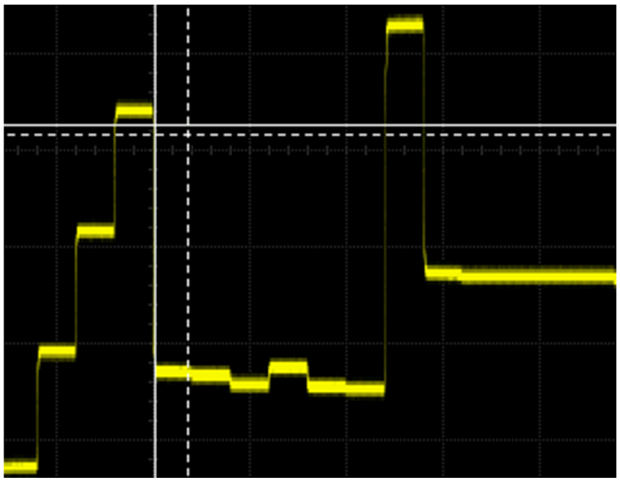


Рис.5. Сигнал при погружении датчика в соленый раствор 8%

После исследования среды на чувствительность проводились эксперименты по изменению напряжения на каналах цилиндрического датчика, погруженного в воду, при воздействии концентрированного раствора соли на поверхность жидкости. Для измерений использовался датчик, погруженный в воду, после чего на поверхность воды были добавлены капли раствора соли. Регистрируя падения напряжения, можно пронаблюдать, как растекается раствор соли на поверхности датчика. Данные записывались с использованием программного обеспечения LCARD, а последующая обработка производилась с помощью программного обеспечения, написанного на языке Python. Следует отметить, что каждый канал состоит из 20 точек измерения, что позволяет получать высокоточные данные о напряжении в динамике.

Результаты анализа рис. 6 показали, что при добавлении соли чувствительные каналы демонстрируют характерное для большей проводимости снижение напряжения. Этот эффект связан с изменением проводимости раствора. Наибольшее изменение напряжения наблюдается в промежутке времени около 2,7–3,5 секунд после начала воздействия, что соответствует фазе активного растворения соли и изменения локальной концентрации маркера. На канале 1 (lamel_5) зафиксировано максимальное снижение напряжения, которое составило порядка 1,5 В, что демонстрирует высокую чувствительность данного элемента.

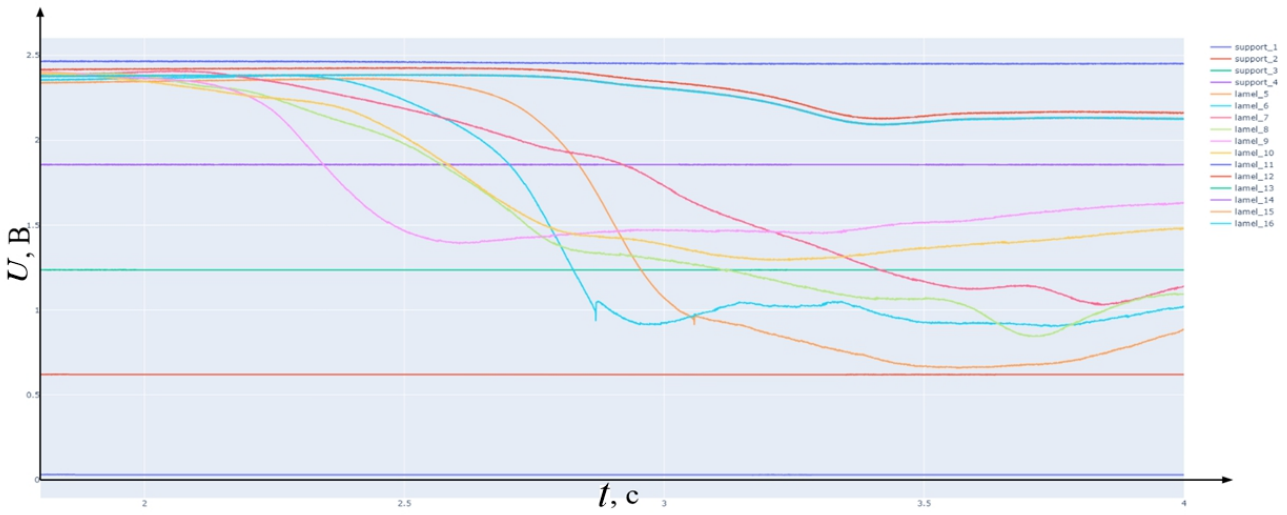


Рис.6. График распределения капли раствора на поверхности датчика

Каналы 2, 3, 4 проявляют нелинейное поведение, сопровождающееся колебаниями напряжения, что может свидетельствовать о неравномерном распределении соли в зоне их действия или о локальных турбулентностях в потоке раствора. Опорные каналы (1–4) остаются стабильными. Показана высокая чувствительность регистрирующих каналов датчика к изменениям проводимости раствора. Использование 20 точек измерения на каждом канале позволило получить детализированную картину изменений.

Исследовались изменения напряжения на многоканальном электро-импедансном датчике. Датчик представляет собой электрическую плату, интегрированную в элемент трубы с 4 опорными и 19 регистрирующими каналами (рис. 7). Для проведения эксперимента нижнюю часть пришлось герметично закрыть дном. Образованную полость мы заполнили водой, после чего на поверхность воды роняли каплю солевого раствора. Раствор растекался по поверхности датчика, вызывая изменения его электрических характеристик.

Капля соленого раствора падала примерно на середину датчика, для анализа использовались каналы 7, 8, 9 и 10 (рис. 8). В начале эксперимента напряжение на всех каналах оставалось стабильным, около 1,5 В. После начала взаимодействия с соленым раствором, примерно через 0,78 секунды от начала эксперимента, на каналах 8 и 9 наблюдалось резкое снижение напряжения до уровня около 0,5 В. Это значительное снижение свидетельствует о сильном воздействии раствора. Напряжение на каналах 7 и 10 изменилось менее существенно, снизившись до 1,2 В. Эти различия, вероятно, связаны с неравномерным растеканием раствора. В ходе эксперимента наблюдались колебания напряжения, особенно выраженные на каналах 8 и 9, с амплитудой около 0,3 В. К концу эксперимента сигналы начали стабилизироваться.

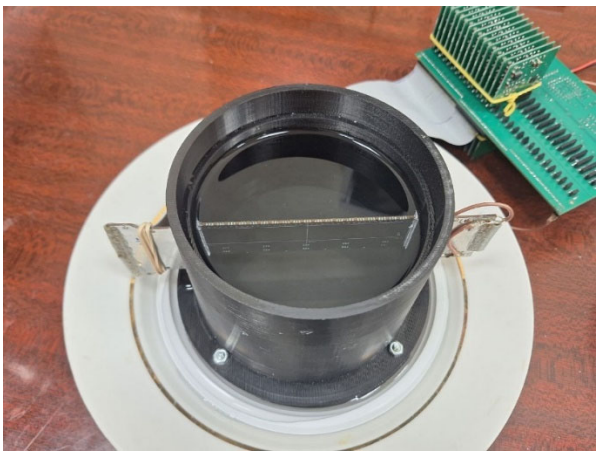


Рис.7. Исследуемая установка с пластинчатым датчиком

Во второй части эксперимента исследовались первые каналы. Капля попала только на канал 1, он продемонстрировал динамические изменения (рис. 9). В начале эксперимента его напряжение также оставалось стабильным, но через 7,7 секунды началось резкое снижение с 1,25 В до 0,55 В. Это указывает на контакт раствора с зоной датчика, контролируемой этим каналом. После изменения напряжение стабилизировалось на новом уровне, что отражает устойчивое увеличение проводимости вследствие воздействия соленого раствора. Амплитуда изменения напряжения для канала 1 составила 0,7 В.

Введение соленого раствора вызывает значительные изменения напряжения в активных каналах. Степень этих изменений зависит от локализации раствора относительно датчика. Опорные каналы продемонстрировали стабильность, что подтверждает достоверность измерений.

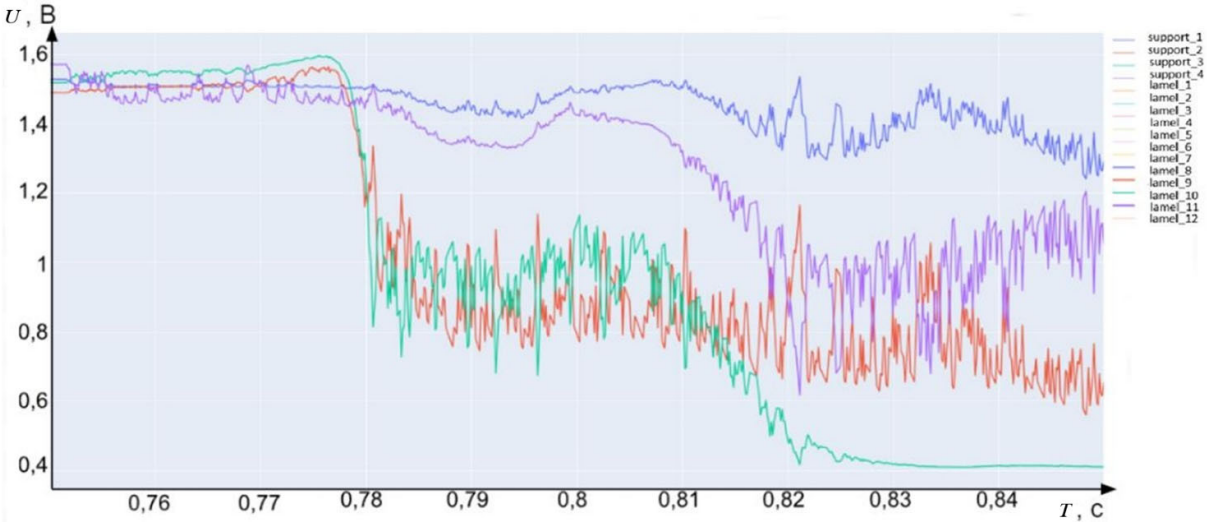


Рис.8. Изменение напряжения на середине датчика

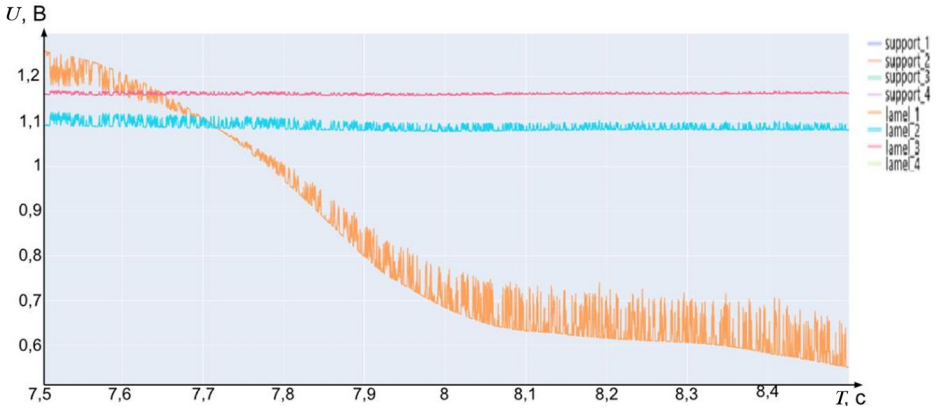


Рис.9. Изменение напряжения в канале 1

Заключение

В данной работе изучены возможности многоточечного электро-импедансного метода диагностики многофазных потоков. Исследованы два типа датчиков. Первый датчик содержал 8 измерительных каналов, второй – 19. Процеведена оценка восприимчивости каналов к наличию газовой фазы вблизи электродов. С помощью второго датчика исследована диффузия солевого раствора при падении в жидкость. Экспериментально подтверждена пригодность многоканальной электроимпедансной системы для анализа фазового состава и динамики потоков. Полученные результаты демонстрируют потенциал метода для практического использования в мониторинге и оптимизации промышленных процессов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121032200034-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Главный В.Г. Развитие кондуктометрических измерительных систем для изучения процессов тепломассопереноса в крупномасштабных моделях энергетических установок. Новосибирск, 2019, с. 10–21.

2. Гусев В.Е., Козлов В.И. Основы электрохимической импедансной спектроскопии. – М.: Наука, 2010. – 256 с.

© И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, А. Д. Ротарь, В. Г. Главный, 2025

УДК 532.8
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-88-95

И. К. Кабардин[1]✉, А. Д. Ротарь[1], В. Г. Мелединн[1], К. С. Зубанов[1]

Исследование распределения скорости из сопла Витошинского методом лазерной доплеровской анемометрии

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. В работе исследованы аэродинамические характеристики шести сопел Витошинского, изготовленных различными технологиями: фрезерованием, 3D-печатью и профессиональным методом. Цель исследования – оценить влияние способа изготовления на качество формирования струи с использованием лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Измерения скорости глицериновых частиц проводились на расстоянии 3 мм от среза сопла с применением лазерного доплеровского анемометра ЛАД-07Т и прецизионного координатного устройства. Для сравнительного анализа использовалась ширина плато скоростного профиля – участка, где скорость остается близкой к максимальной (в пределах ±2%). Установлено, что референсное сопло обеспечивает наибольшую ширину профиля (8,0 мм), что свидетельствует о его высокой эффективности в формировании устойчивого потока. Сопла, изготовленные фрезерованием, показали значения от 6,8 до 3,9 мм. Пластиковые сопла, произведенные на 3D-принтере, имеют ширину профиля 4,7 и 4,5 мм, что делает их приемлемым вариантом при ограниченном бюджете. Результаты подтверждают важность технологии изготовления для получения стабильного ударного профиля скорости. Полученные данные позволяют рекомендовать типы сопел в зависимости от требований к точности и доступных ресурсов. Работа демонстрирует применимость ЛДА для оценки качества потока и может быть использована при подготовке экспериментальных исследований в области гидро- и аэродинамики.

Ключевые слова: сопло Витошинского, ЛДА, среднее значени скорости, пульсации скорости

I. K. Kabardin[1]✉, A. D. Rotar[1], V. G. Meledin[1], K. S. Zubanov[1]

Study of velocity distribution from vitoshinsky nozzle by laser doppler anemometry method

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. The paper studies the aerodynamic characteristics of six Vitoshinsky nozzles manufactured using different technologies: milling, 3D printing and a professional method. The aim of the study is to evaluate the influence of the manufacturing method on the quality of jet formation using laser Doppler anemometry (LDA). The velocity of glycerol particles was measured at a distance of 3 mm from the nozzle exit using a LAD-07T laser Doppler anemometer and a precision coordinate device. For comparative analysis, the width of the velocity profile plateau was used - a section where the velocity remains close to the maximum (within ±2%). It was found that the reference nozzle provides the largest profile width (8.0 mm), which indicates its high efficiency in forming a stable flow. Nozzles manufactured by milling showed values from 6.8 to 3.9 mm. The 3D printed plastic nozzles have a profile width of 4.7 and 4.5 mm, making them an acceptable option for budget-conscious individuals. The results confirm the importance of manufacturing technology for obtaining a stable impact velocity profile. The obtained data allow recommending nozzle types depending on the accuracy re-

quirements and available resources. The work demonstrates the applicability of LDA for flow quality assessment and can be used in the preparation of experimental studies in the field of hydro- and aerodynamics.

Keywords: Vitoshinsky nozzle, LDA, average speed value, speed pulsations

Введение

Данная работа посвящена исследованию скорости струи, истекающей из сопла Витошинского, методом лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА).

Изучение характеристик газовых и жидкостных струй имеет важное значение в аэродинамике, энергетике, ракетной технике и других областях. Одним из ключевых параметров является скорость истечения, от которой зависят динамические и энергетические характеристики потока. Метод лазерной доплеровской анемометрии широко применяется для бесконтактного и высокоточного измерения скоростей в различных средах, что делает его эффективным инструментом для подобных исследований.

Несмотря на существующие работы, посвященные измерениям в струйных течениях, вопросы, связанные с особенностями использования ЛДА для анализа сопел специфической геометрии, требуют дополнительного изучения. В частности, сопло Витошинского обладает уникальными характеристиками, влияющими на структуру струи, что обуславливает необходимость экспериментального исследования его параметров.

Целью данной работы является определение скорости струи, формируемой соплом Витошинского, с помощью лазерной доплеровской анемометрии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Изучить принцип работы лазерного доплеровского анемометра и его применение для измерения скорости в струйных течениях.

2. Описать особенности конструкции сопла Витошинского и его влияние на формирование струи.

3. Провести экспериментальные измерения скорости струи с использованием ЛДА.

4. Оценить пригодность различных сопел для различных экспериментов.

Работа имеет практическую значимость, так как полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов, связанных с истечением газовых потоков в технических устройствах.

Описание метода

Для исследования характеристик газожидкостных потоков, в частности скорости истечения струи из сопла Витошинского, в данной работе применяется метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Этот метод основан на анализе доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися частицами-трассерами в исследуемом потоке [1].

В используемой измерительной системе ЛАД-0хх реализована дифференциальная схема измерений, где два когерентных лазерных пучка с длиной волны

λ = 532 нм пересекаются в контролируемой области, образуя интерференционную картину с известным пространственным периодом:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\alpha}. \quad (1)$$

Здесь α = 7,5° – угол между оптическими осями пучков, что обеспечивает чувствительность системы в диапазоне скоростей от 0,05 до 80 м/с с погрешностью не более 0,5% для продольных компонент скорости [2].

При прохождении частицы-трассера через измерительный объем возникает доплеровский сигнал, частота которого определяется выражением:

$$FD = \frac{\nu}{\Lambda}\cos\varphi = \frac{2\nu}{\lambda}\sin\alpha\cos\varphi, \quad (2)$$

где ν – скорость частицы; φ – угол между вектором скорости и направлением чувствительности системы.

Для обеспечения трехкомпонентных измерений в работе используется схема с двумя двухкомпонентными ЛДА, развернутыми относительно друг друга на угол 8°±2° на специальной юстировочной платформе.

Особенностью применяемой методики является использование адаптивной временной селекции сигналов, что позволяет:

1) повысить отношение сигнал/шум на 15-20 дБ по сравнению с традиционными схемами;

2) обеспечить надежное детектирование сигналов в условиях обратного светорассеяния;

3) минимизировать взаимное влияние измерительных каналов [1].

Система регистрирует три составляющих доплеровского сигнала: низкочастотный «пьедестал», связанный с общим уровнем рассеяния, а также квадратурные синусную и косинусную компоненты, несущие информацию о частоте и фазе сигнала. Для обработки данных применяется специализированное программное обеспечение, включающее алгоритмы цифровой фильтрации (вейвлет-анализ), методы спектрального анализа (БПФ с окном Ханна) и процедуры статистической обработки (расчет средних значений, турбулентных пульсаций). Точность измерений обеспечивается использованием FPGA-процессоров для обработки сигналов в реальном времени, системой температурной стабилизации лазерных диодов и автоматической коррекцией коэффициентов усиления фотоприемников.

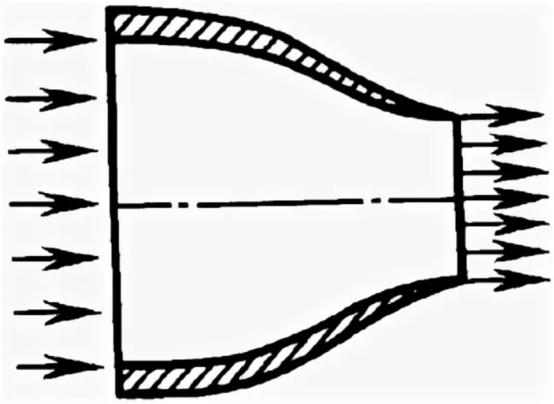


Рис. 1. Устройство сопла Витошинского

Сопло Витошинского [3] представляет собой профилированный канал с особым законом изменения площади поперечного сечения, обеспечивающим эффективное преобразование тепловой энергии газа в кинетическую энергию направленного потока. Его отличительной особенностью является специально рассчитанная форма, которая позволяет получать стабильные сверхзвуковые струи с минимальными волновыми потерями при переходе через скорость звука (критическое сечение). Конструкция сопла обеспечивает формирование ламинарного ядра потока с углом раскрытия струи около 12° для воздуха, что делает его особенно полезным для исследований в аэродинамике и газовой динамике.

Экспериментальная часть

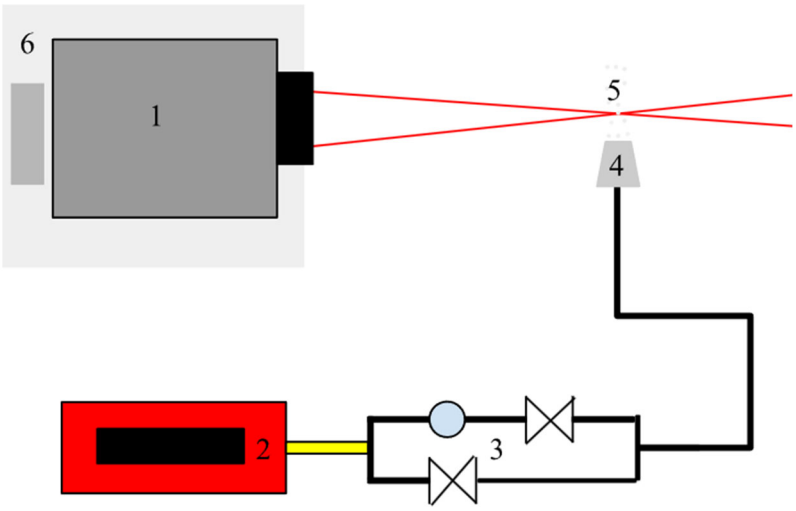


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – измеритель скорости лазерный доплеровский ЛАД-0хх, 2 – компрессор, 3 – источник частиц глицерина, 4 – образец сопла Витошинского, 5 – поток частиц, 6 – координатное устройство

В ходе эксперимента последовательно исследовались шесть различных сопел Витошинского, каждое из которых поочередно устанавливалось в испыта-

тельный стенд. Для каждого сопла проводился независимый цикл измерений: после монтажа конкретного образца выполнялись замеры скорости частиц глицерина на заданных расстояниях от среза (3, 10, 20, 30, 40 и 50 мм) с использованием лазерного доплеровского анемометра ЛАД-07т. Анемометр был закреплен на прецизионном координатном устройстве, обеспечивающем точность позиционирования по трем осям. Для каждого положения измерения предварительно выполнялась юстировка системы, контролировались параметры подачи глицериновых частиц и поддерживались постоянные условия эксперимента.

Первый эксперимент проводился для сопла, сделанного профессионалами, его можно использовать как референсное. Были получены результаты измерения профиля скорости, приведенные на рис 3.

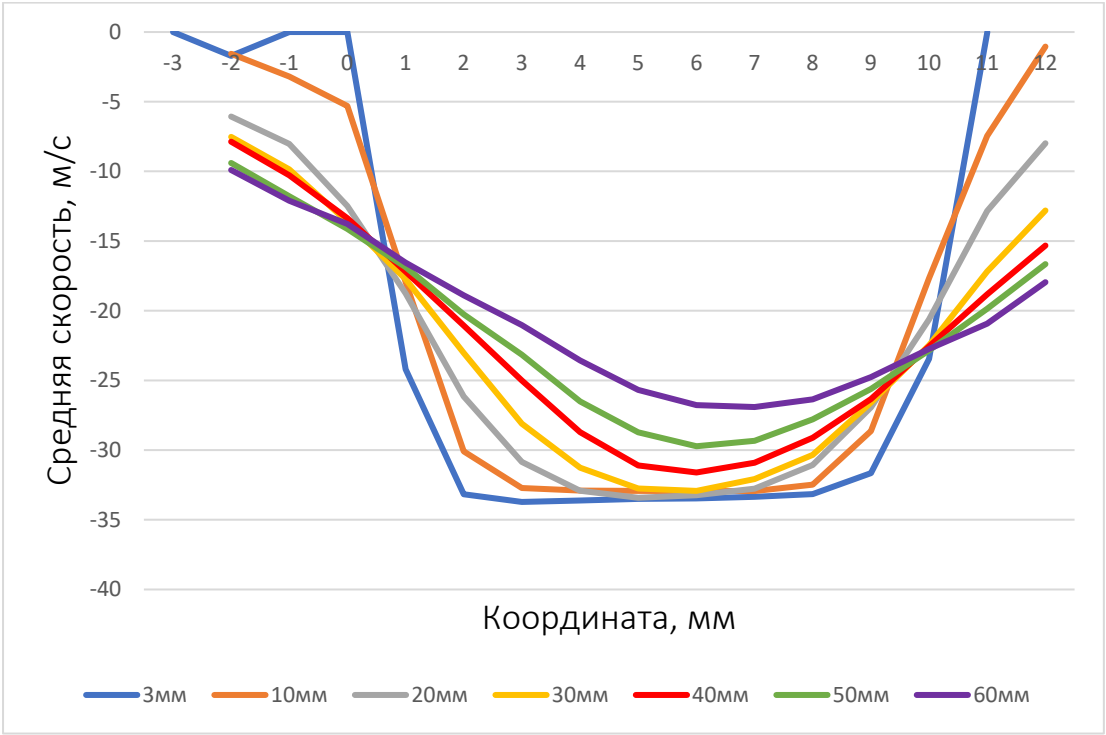
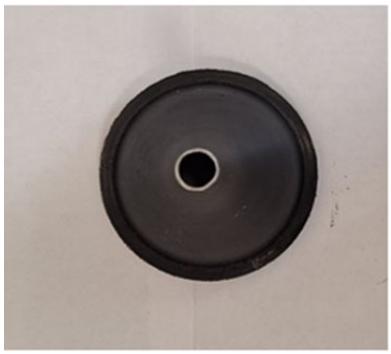


Рис.3. Профили струй из референсного сопла на разных расстояниях

Из рис. 3. видно, что ударный профиль сохраняется только вблизи среза сопла, что соответствует ламинарному истечению, дальше 3 мм от среза профиль все больше приобретает форму, характерную для свободной струи. Поэтому дальнейший анализ результатов был ограничен изучением характеристик потока именно вблизи среза сопла – на расстоянии 3 мм, где можно однозначно оценить влияние конструкции сопла на качество формируемой струи. Измерения на более удаленных расстояниях не представляют практической ценности в рамках данного исследования, так как теряется информативность относительно начальных условий истечения.

Были проведены серии экспериментов для каждого из сопел, пример полученных данных для референсного сопла представлен на рис. 4.







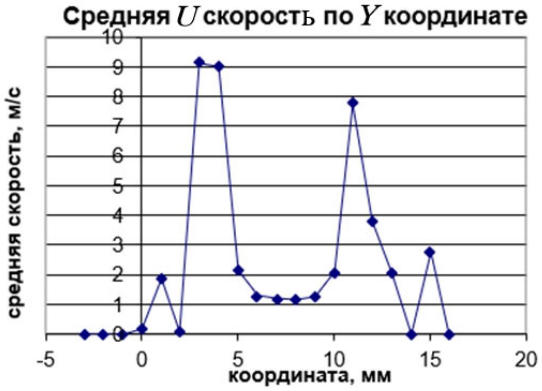


Рис. 4. Пример данных референсного сопла с фотографиями

Для каждого сопла была получена зависимость скорости частиц глицерина от поперечной координаты в ближней зоне истечения. Все графики скоростных профилей были нормированы и наложены на один график (рис. 5) для наглядного сравнения. Анализ графиков показал, что все сопла формируют выраженный ударный профиль вблизи среза, однако его ширина и равномерность зависят от качества изготовления. Результаты измерений ширины ударного профиля для всех исследуемых сопел представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные ширины профиля различных сопел

Сопло	Ширина профиля
1- референсное	8,0 мм
2- фрезерованное1	7,2 мм
3- фрезерованное2	5,0 мм
4- фрезерованное3	3,9 мм
5- из пластика	4,7 мм
6- из пластика	4,5 мм

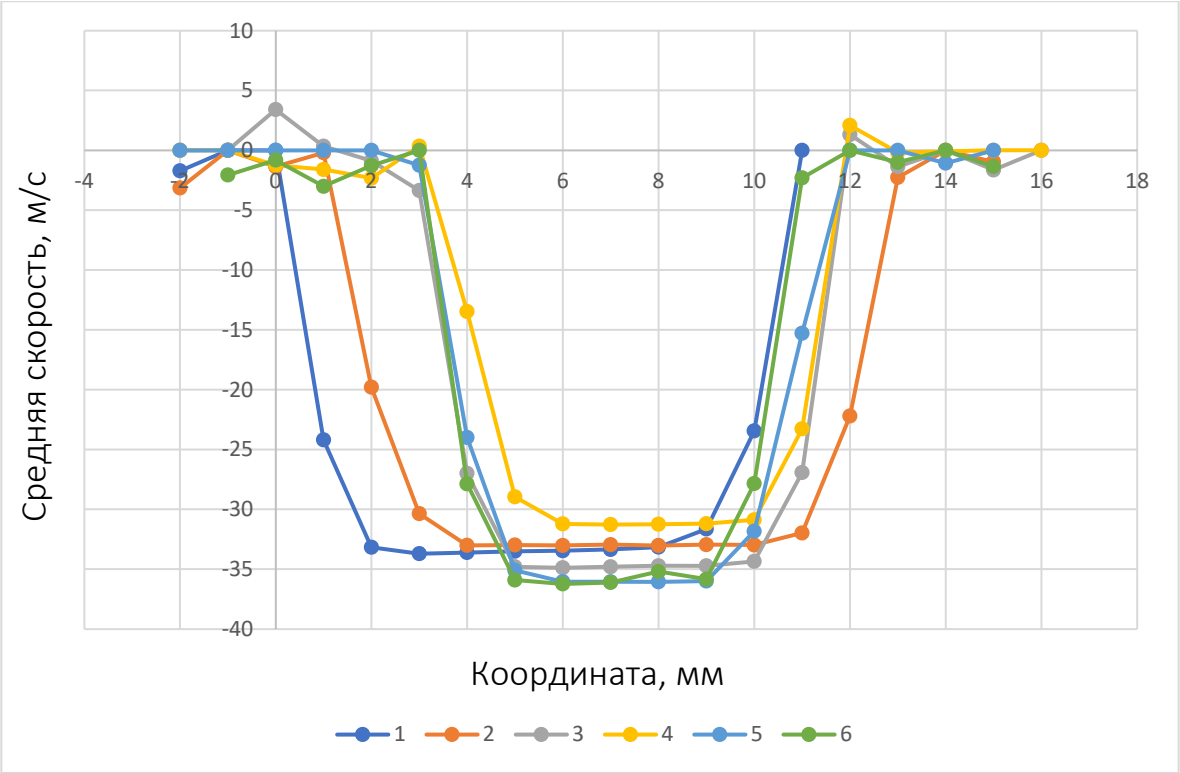


Рис.5. Профили истечения струй из сопел на расстоянии 3 мм от среза: 1 – референсное; 2 – фрезерованное1; 3 – фрезерованное2; 4 – фрезерованное3 (с особенностью, есть дефект производства); 5 – из пластика, 6 – из пластика (с особенностью, есть дефект производства)

Для количественной оценки качества формирования струи был проведен анализ ширины плато скоростного профиля – то есть участка, где скорость остается близкой к максимальной (в пределах ±2% от максимума). Такой подход позволил определить протяженность области, в которой поток сохраняет устойчивую структуру без значительных завихрений или рассеивания.

На основании проведенных измерений ширины скоростного профиля у шести различных сопел Витошинского установлено, что референсное сопло обеспечивает наибольшую ширину плато – 8,0 мм, что свидетельствует о его высокой аэродинамической эффективности и способности формировать устойчивый поток. С увеличением точности изготовления (фрезерованные сопла) ширина профиля уменьшается от 7,2 мм до 3,9 мм, демонстрируя снижение качества потока, учитывая, что ширину профиля 3,9 мм имеет сопло с дефектом производства. Пластиковые сопла, изготовленные на 3D-принтере, показали промежуточные значения – 4,7 мм и 4,5 мм, что указывает на их работоспособность, но с меньшей стабильностью потока.

Таким образом, выбор сопла зависит от требований к точности: для экспериментов с высокой воспроизводимостью предпочтительнее использовать референсное или фрезерованные сопла, тогда как пластиковые могут применяться при ограниченном бюджете и менее жестких требованиях к качеству потока. По-

лученные данные подтверждают важность технологии изготовления сопла в формировании устойчивого ударного профиля скорости.

Заключение

В ходе работы было проведено экспериментальное исследование шести сопел Витошинского с использованием лазерного доплеровского анемометра ЛАД-07Т. Измерения скорости частиц глицерина проводились на фиксированных расстояниях от среза сопла, что позволило оценить аэродинамические характеристики каждого образца. Установлено, что сопла, изготовленные на 3D-принтере, показали вполне удовлетворительные результаты и могут быть рекомендованы при ограниченном бюджете. При этом профессионально изготовленные сопла обеспечивают более стабильный и однородный поток, что важно для высокоточных измерений. Выбор типа сопла должен определяться задачами эксперимента и доступными ресурсами. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что пластиковые сопла являются приемлемым вариантом в случае, если к точности не предъявляются жесткие требования. Таким образом, исследование подтверждает возможность использования экономичных решений в научных и учебных задачах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121032200034-4

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ЛАД-0xx: измерители скорости лазерные доплеровские. Руководство по эксплуатации / ОАО «Институт оптико-электронных информационных технологий». — Новосибирск, 2023.

2. Наумов И.В., Бакакин Г.В., Меледин В.Г. и др. Лазерная доплеровская анемометрия в задачах тепломассопереноса и турбулентности: препринт № 2-1059 / Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2020.

3. Кузнецов А. Г., Смирнов Н. Н. Сопловые устройства в аэродинамических испытаниях: справочное издание. – Санкт-Петербург: Политехника, 2017. – 320 с.

© И. К. Кабардин, А. Д. Ротарь, В. Г. Меледин, К. С. Зубанов, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-96-99

М. Р. Гордиенко[1]✉, И. К. Кабардин[1], П. Д. Лобанов[1], И. А. Евдокименко[1]

Исследование всплытия газового пузыря оптическими и электроимпедансным методами

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: fregat120@yandex.ru

Аннотация. В двухфазных потоках важной задачей является оценка газовой составляющей среды [1,2]. Поэтому нужно динамически оценивать размер пузырей. В данной работе для оценки размера пузыря применяется электроимпедансная плата с 24 измерителями, расположенная по диаметру трубы. Данные с платы собирались с помощью АЦП и программно выдавались в виде файла. С помощью этой платы были проведены измерения одиночного конгломерата пузырей. Все пузыри, попавшие на плату, отображаются в виде заметных пиков сигнала. Пики сигнала при прохождении пузыря через измерители позволяют оценить их размер.

Ключевые слова: пузырь, электроимпеданс, сигнал

M. R. Gordienko[1]✉, I. K. Kabardin[1], P. D. Lobanov[1], I. A. Evdokimenko[1]

Study of gas bubble ascent using optical and electrical impedance methods

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: fregat120@yandex.ru

Abstract. In two-phase flows, an important task is to evaluate the gas component of the medium [1,2]. Therefore, it is necessary to dynamically estimate the size of the bubbles. In this work, an electrical impedance board with 24 meters located along the diameter of the pipe is used to estimate the size of the bubble. Data from the board was collected using an ADC and programmatically output as a file. A single bubble conglomerate was measured using this board. All bubbles that hit the board are displayed as noticeable signal peaks. The peaks of the signal as the bubble passes through the meters allow us to estimate their size.

Keywords: bubble, electrical impedance, signal

Введение

Для решения задач по измерению газосодержания всплывающих пузырей была созданая специальная плата с измерителями электроимпеданса. Она позволяет определять прохождение пузыря через измерители этой платы, определяя его размеры по времени прохождения.

Методы и материалы

Экспериментальные измерения проводятся в водном столбе со стоячей водой. Рабочий участок трубы представляет из себя цилиндрический участок длиной в 1000 мм и диаметром 100 мм. Плата с 24 измерителями располагалась по диаметру трубы сверху. Измерители отстояли друг от друга на расстояние 4 мм

Пузыри создавались при помощи впрыскивания шприцом в поток вертикально снизу. Игла шприца располагалась за метр до платы, чтобы не влиять на поток, набегающий на плату.

Скорость подъема пузырей в столбе составляла примерно 0,5 м/с. Для одиночного пузыря размером 1 мм, пролетающего через измеритель со скоростью 1 м/с, необходимо, чтобы промежуток времени между измерениями был не более 1 мм / 1000 мм/с = 1 мс. Данные с платы снимались с помощью АЦП LCARD E20-10, для которого была написана программа, обрабатывающая поток данных со скоростью 10 МГц. Затем программа выдавала значения для каждого измерителя из платы в зависимости от номера измерения. Временной промежуток между измерениями составлял 56 мкс, что достаточно для данного потока.

Результаты

При запуске одиночного впрыскивания воздуха из шприца был создан конгломерат пузырей (рис. 1) размеров от 1 мм до 10 мм. Часть из них накалывалось на измерительную плату.



Рис. 1. Пузыри в цилиндрической трубе

После этого при помощи программы были построены зависимости значения сигнала для каждого датчика платы от номера измерния во время пролета пузырей (рис. 2).



Рис. 2. Сигнал платы в зависимости от номера измерения
для каждого из 24 датчиков

Все данные сосередоточены в промежутке измерений с 1500 по 8000 или в течение 364 мс. Для более подробного рассмотрения возьмем участок с 1500 по 2200 отсчет, снятый на протяжении 40 мс (рис. 3).

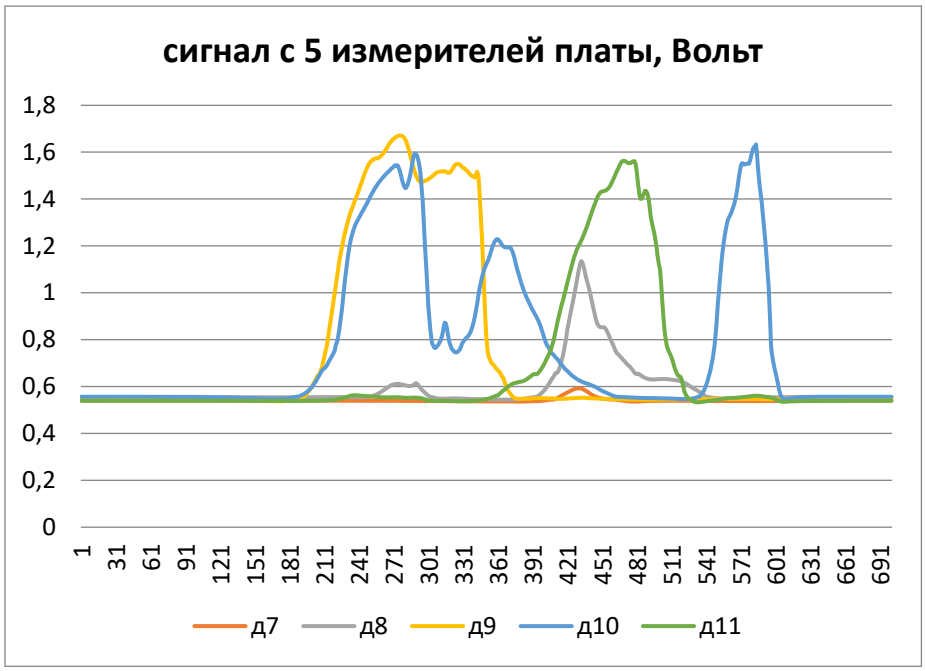


Рис. 3. Сигнал платы для 5 подряд идущих измерителей.
Взяты отсчеты с 21500 по 22200 из рис. 2

Из данных рис. 3 можно увидеть 4 пузыря. Первый, крупный, накололся на датчики 9 и 10, а также задел 8-й. Второй прошел через 11-й датчик, третий прошел через 10-й датчик позже, чем первый. Четвертый пузырь прошел через 8-й датчик.

Обсуждение

Максимальное время прохождения пузыря составляет 16,8 мс, что соответствует 300 измерениям. При скорости 0,5 м/с это соотсевтствует размеру пузыря в 8,5 мм. Измерители рассполагаются на расстоянии 4 мм друг от друга. Пролетевший большой пузырь как раз задел 3 измерителя.

В связи с этим можно утверждать, что плата позволяет оценивать размер пузырей с погрешностью менее трети размера пролетевшего пузыря.

Заключение

Была опробована плата с измерителями электроимпеданса на измерении размера пролетевших пузырей, выпущенных из шприца. Измерители платы улавливают пики сигнала при накалывании пузырей на плату и позволяют оценить размер пролетевшего пузырька, что позволяет использовать данный метод для диагностики двухфазного потока.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии / Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2008. – 75 с.

2. Косарев В. И., Мухин Л. Н., Штернов А. А. Способ определения расхода компонентов двухфазного потока и система для его осуществления. Патент №2339915.

© М. Р. Гордиенко, И. К. Кабардин, П. Д. Лобанов, И. А. Евдокименко, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-100-103

М. Р. Гордиенко[1]✉, И. К. Кабардин[1], Н. А. Прибатурин[1], В. Г. Меледин[1]

Диагностика всплытия имитатора газового пузыря оптическими и электроимпедансными методами

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: fregat120@yandex.ru

Аннотация. Для решения задач по измерению газосодержания всплывающих пузырей была созданая специальная плата с измерителями электроимпеданса. Необходимо выяснить насколько далеко и насколько значительно влияет проплывающмй большой объект на показания измерителей электроимпеданса. В качестве тела – имитатора пузыря был использован шарик для пинг понга. Данные показывают, что отличающийся от погрешности сигнал удается получить при передвижении объекта не далее, чем в 0,45 мм от платы.

Ключевые слова: имитатор пузыря, электроимпеданс, сигнал

M. R. Gordienko[1]✉, I. K. Kabardin[1], N. A. Pribaturin[1], V. G. Meledin[1]

Diagnostics of ascent of a gas bubble simulator by optical and electro-impedance methods

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: fregat120@yandex.ru

Abstract. To solve the problems of measuring the gas content of pop-up bubbles, a special board with electrical impedance meters was created. It is necessary to find out how far and how significantly a passing large object affects the readings of electrical impedance meters. A ping pong ball was used as a bubble simulator body. The data show that a signal different from the error can be obtained when the object is moving no further than 0.45 mm from the board.

Keywords: bubble simulator, electrical impedance, signal

Введение

Для решения задач по измерению газосодержания всплывающих пузырей [1, 2] была созданая специальная плата с измерителями электроимпеданса. Было важно измерить, как плата реагирует на приближающиеся объекты (имитаторы газового пузыря), а именно насколько далеко заметно влияние объекта.

Методы и материалы

Экспериментальные измерения проводятся в водном столбе со стоячей водой. Рабочий участок трубы представляет из себя цилиндрический участок длиной в 1000 мм и диаметром 100 мм. Плата с 24 измерителями располагалась по диаметру трубы сверху. Измерители отстояли друг от друга на расстояние 4 мм.

В качестве имитатора газового пузыря был опробован шарик для пинг понга, который подносился вплотную к измерителям снизу, тем самым имитируя подплывание пузыря. Шарик – герметичный и наполнен воздухом.

Данные сигнала с измерителей платы собирались АЦП LCARD E20-10, программно обрабатывались и выдавались в виде записанного потока данных, с интервалом между измерениями 56 мкс.

Результаты

Были проведены два эксперимента. В первом шарик проходил рядом с платой по стенке, во втором он проходил до платы и касался ее.

После этого при помощи при помощи программы были построены зависимости значения сигнала для каждого датчика платы от номера измерения во время пролета пузырей.

В первом эксперименте (рис. 1) тестировалось прохождение шарика для пинг понга диаметром 40 мм в 1 мм от платы. Не замечено отличных от погрешности отклонений сигнала.

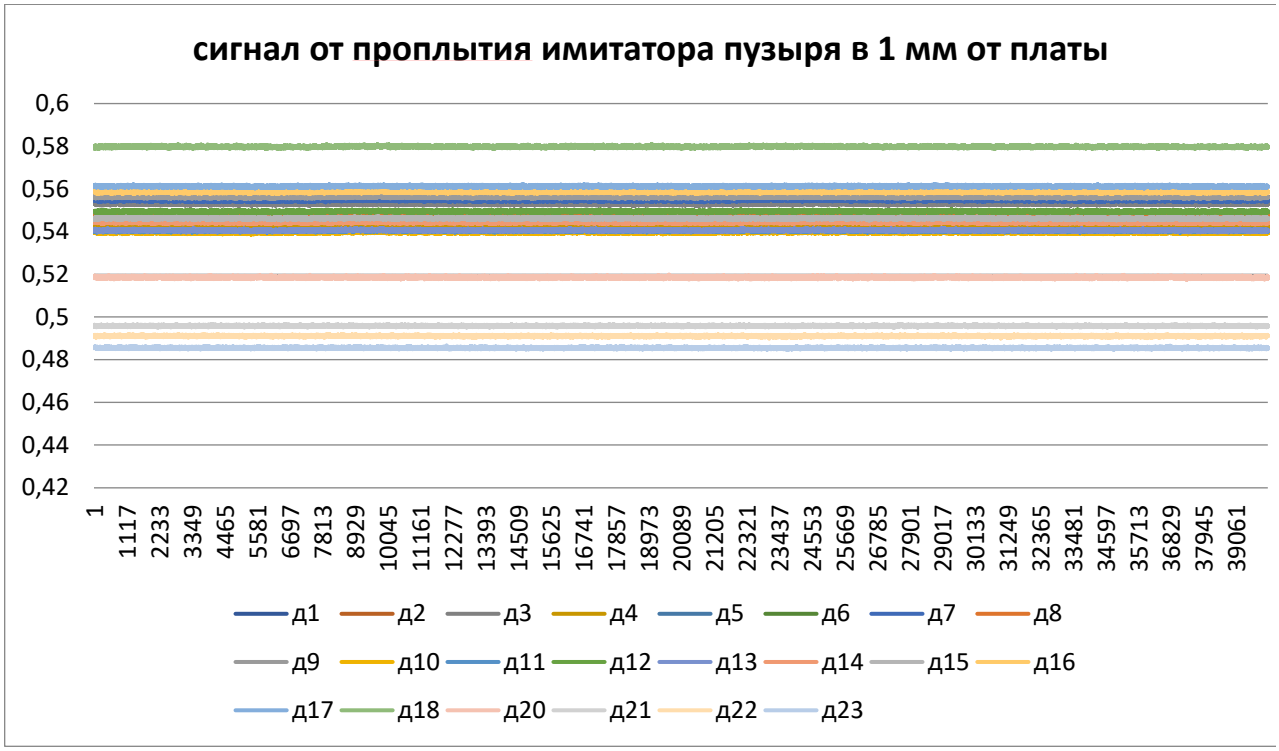


Рис. 1. Уровень сигнала измерителей платы
при проплывании полого объекта диаметра 40 мм в 1 мм от платы

В эксперименте с постепенным приближением шарика (рис. 2) для пинг понга получилось увидеть отклонения до 0,1 Вольта. Шарик приближали к плате с измерителями на скорости 10 мм в секунду.

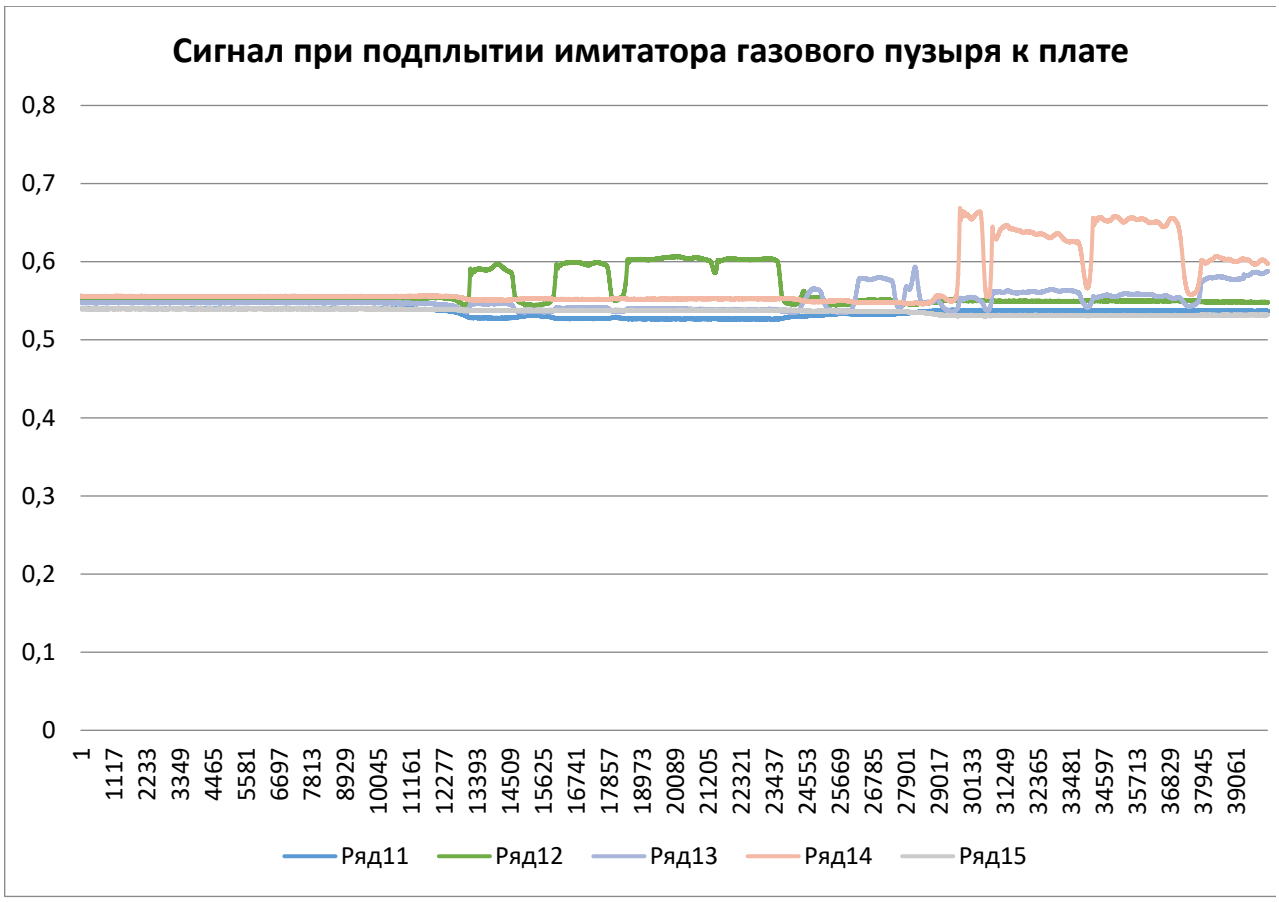


Рис. 2. Уровень сигнала измерителей платы при поднесении на скорости 10 мм в секунду и затем прикосновении полого объекта диаметра 40 мм к плате с измерителями

Обсуждение

Рассмотрим подробнее момент столкновения с платой (рис. 3) для 5 измерителей рядом с местом прикосновения.

До прикосновения сигнал измерителя начинает падать на 0,01 Вольта в течение 800 измерений. Затем во время прикосновения происходит резкий рост сигнала до 0,05 Вольт. Получается если взять скорость перемещения шарика, время реакции платы и расстояние между измерениями, то получится, что измерители платы начинают реагировать на объект на расстоянии 800·0,000056 с·10 мм/с =0,45 мм до объекта.

Заключение

Была опробована плата с измерителями электроимпеданса при измерении имитатора пузыря в виде шарика для пинг понга диаметром 40 мм. Данные показывают, что отличающийся от погрешности сигнал удается получить при передвижении объекта не далее, чем в 0,45мм от платы.

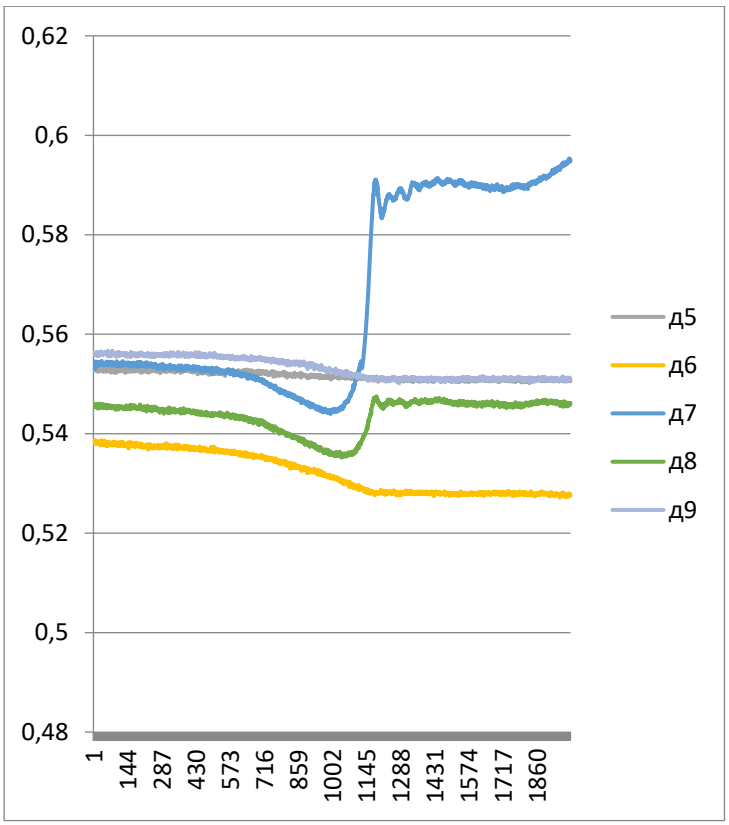


Рис. 3. Уровень сигнала измерителей платы при поднесении на скорости 10 мм в секунду и затем прикосновении полого объекта диаметра 40 мм к плате с измерителями. Подробно рассмотрено поднесение имитатора пузыря с последующим прикосновением

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акатов А. А., Коряковский Ю. С. Будущее ядерной энергетики. Реакторы на быстрых нейтронах. Информационные центры по атомной энергии. Москва, 2012. – 36 с.
2. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии / Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2008. – 75 с.

© М. Р. Гордиенко, И. К. Кабардин, Н. А. Прибатурин, В. Г. Меледин, 2025

УДК 533.69.01
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-104-108

С. В. Какаулин[1]✉, И. К. Кабардин[1]

Исследование свойств источников освещения при повышении временного разрешения метода фазовой триангуляции

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается влияние характеристик источников освещения на качество и устойчивость изображений при реализации метода фазовой триангуляции в условиях повышенного временного разрешения. Особое внимание уделено анализу поведения DLP- и LCD-проекторов при различных частотах проецирования и синхронизации с высокоскоростными камерами. В ходе экспериментов исследовались эффекты мерцания, нестабильности яркости и задержки между генерацией изображения и его регистрацией. Использованы методы регистрации световых импульсов с помощью фотоприемников и осциллографа, а также автоматизированный анализ видеозаписей. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по выбору параметров проектора и камеры, обеспечивающих наименьшие искажения при съемке фазовых паттернов, что критически важно для ускорения 3D-реконструкции без потери точности.

Ключевые слова: DLP- и LCD-проекторы, автоматизация, метод фазовой триангуляции

S. V. Kakaulin[1]✉, I. K. Kabardin[1]

Investigation of properties of lighting sources with increasing time resolution of the phase triangulation method

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Abstract. The paper considers the influence of the characteristics of lighting sources on the quality and stability of images when implementing the phase triangulation method in conditions of increased temporal resolution. Special attention is paid to analyzing the behavior of DLP and LCD projectors at different projection frequencies and synchronization with high-speed cameras. The experiments investigated the effects of flickering, brightness instability, and the delay between image generation and recording. Methods of recording light pulses using photodetectors and an oscilloscope, as well as automated analysis of video recordings, were used. The results obtained allow us to formulate recommendations on the choice of projector and camera parameters that ensure the least distortion when shooting phase patterns, which is crucial for speeding up 3D reconstruction without loss of accuracy.

Keywords: DLP and LCD projectors, automation, phase triangulation method

Введение

Метод фазовой триангуляции является одним из наиболее точных и широко используемых подходов в системах активного 3D-сканирования. Он основан на проекции на объект серии структурированных (обычно синусоидальных) паттер-

нов и регистрации искажений этих паттернов с помощью видеокамеры. По фазовому сдвигу между зарегистрированными изображениями можно вычислить глубину сцены с высокой точностью. Однако, одной из основных проблем, ограничивающих применение этого метода в задачах, требующих высокой скорости, остается временная несогласованность между источником (проектором) и приемником (камерой). Эта несогласованность приводит к появлению переходных состояний в кадрах – частичной проекции паттернов, мерцанию и искажению фазовых градиентов, что делает невозможной корректную фазовую реконструкцию.

Современные камеры обладают высокой частотой съемки (до 500–1000 кадров в секунду и выше), что открывает перспективы значительного ускорения всего цикла 3D-сканирования. Однако, при отсутствии аппаратной синхронизации с проектором и точной временной координации проекции паттернов съемка на высокой скорости может привести к еще большей нестабильности изображений. Таким образом, задача сокращения времени на сканирование до 1 секунды или менее требует не только высокоскоростного оборудования, но и глубокого понимания и управления временными характеристиками системы.

В данной работе проводится комплексное исследование влияния временного разрешения и согласованности компонентов системы фазовой триангуляции на стабильность захвата изображений. С использованием фотоприемника и осциллографа измеряется фактическая частота обновления проектора и фиксируются возможные нестабильности. Параллельно проводится высокоскоростная съемка проецируемых паттернов камерой с частотой до 540 кадров в секунду, что позволяет в реальном времени проанализировать переходные процессы при смене паттернов. В процессе экспериментов разрабатывается и реализуется методика определения и оптимизации временного смещения (capture offset), позволяющая регистрировать только стабильные кадры без переходов.

Результаты эксперимента демонстрируют возможность устойчивой съемки фазовых паттернов даже при высокой скорости проекции, что является важным шагом к реализации быстродействующих 3D-сканеров на базе метода фазовой триангуляции.

Экспериментальная установка, материалы и методики экспериментов

Целью эксперимента являлось исследование поведения источников освещения, используемых для проецирования фазовых паттернов, в условиях высокоскоростной съемки. Основная задача заключалась в определении степени стабильности изображения, формируемого проектором, и его взаимодействия с высокочастотной видеорегистрацией, характерной для ускоренного варианта метода фазовой триангуляции.

В качестве регистратора использовалась высокоскоростная CMOS-камера DMM 37UX287-ML, обеспечивающая частоту съемки до 539 кадров в секунду при разрешении 720×540 пикселей в монохромном режиме. Все автоматические настройки экспозиции, усиления и баланса яркости были отключены. Экспози-

ция устанавливалась вручную, в диапазоне от 1/120 до 1/2000 секунды, в зависимости от эксперимента.

В качестве источников освещения использовались два типа проекторов: LCD-проектор (INFOCUS INL2156) и стандартный монитор с частотой обновления 60 Гц. На проекционную поверхность последовательно выводились черно-белые и синусоидальные фазовые паттерны. Частота смены изображений контролировалась алгоритмом. Также проводились эксперименты с постоянным белым фоном, позволяющим оценить мерцание и скорость развертки самого устройства проецирования.

Для оценки временной стабильности изображения применялись два подхода. Первый – визуальный анализ яркости отдельных пикселей и областей с использованием программной обработки видеозаписей. Второй – аппаратное измерение задержек и сигналов с помощью фотоприемников и цифрового осциллографа. В последнем случае регистрировались световые импульсы от экрана или проектора при помощи фотодиодов, установленных в фиксированных точках изображения.

Синхронизация видео и оптических сигналов позволила выявить задержки между началом проецирования и регистрацией изображения, а также оценить повторяемость и стабильность фазовых структур при различных режимах. Полученные данные легли в основу оценки пригодности различных источников света для использования в ускоренных системах фазовой триангуляции.

Результаты

В результате проведенных экспериментов была подтверждена высокая чувствительность метода фазовой триангуляции к временной согласованности между проектором и камерой. При отсутствии аппаратной синхронизации и использовании высокочастотной видеосъемки удалось эмпирически выделить диапазон частот проекции, в котором возможно стабильное извлечение кадров, свободных от переходных искажений.

Наиболее устойчивое поведение системы наблюдалось при установке частоты проектора на 20 Гц. В этих условиях один паттерн отображается на протяжении 50 мс, из которых более 40 мс приходятся на стабильную фазу проекции. Это позволяет с высокой надежностью захватывать изображения в моменты, когда паттерн полностью сформирован на экране. Проведенная съемка при 539.96 FPS и последующий анализ яркости каждого кадра показали наличие четких плато, соответствующих стабильному отображению черных и белых изображений. Автоматизированный выбор по одному кадру из каждого плато позволил формировать серию устойчивых снимков, пригодных для фазовой обработки без дополнительных коррекций.

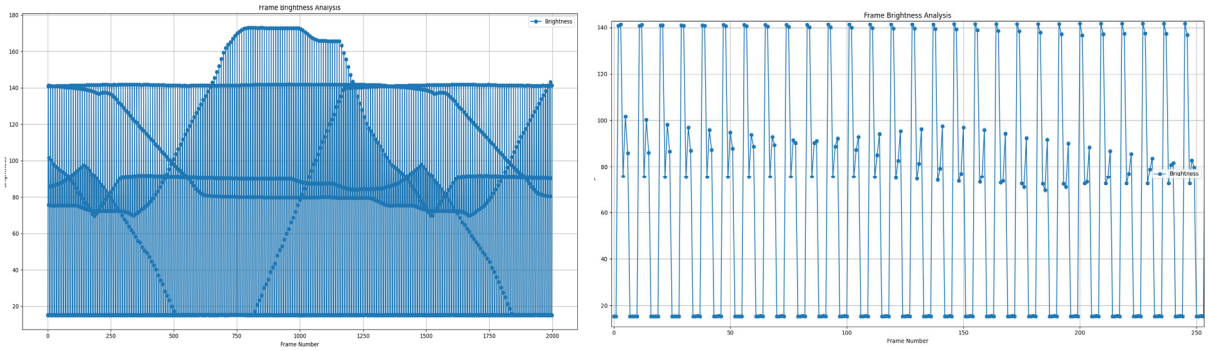


Рис 1. График яркости паттерна от номера кадра (проявляется мерцание и рассинхронизация). 120 Гц проектор, 600 кадров в секунду.

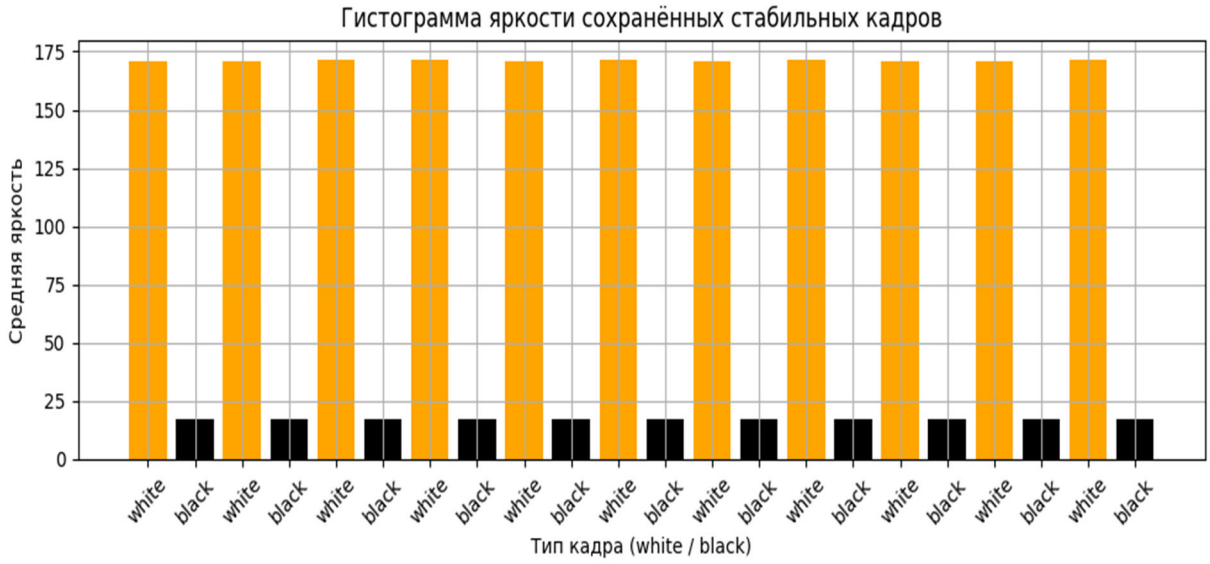


Рис 2. График отображает полученные по одному стабильному черному и белому кадру из каждого цикла проекции, чтобы избежать влияния развертки и переходных состояний проектора

При увеличении частоты проекции (30–60 Гц) наблюдалось значительное сокращение временного интервала стабильной проекции, в результате чего доля переходных кадров возрастала, а плато становились менее выраженными. Особенно критичным становилось это поведение при 60 Гц: стабильная часть кадра составляла менее 1 мс, что затрудняло точное попадание камеры в нужный временной интервал даже при использовании capture offset.

Таким образом, основной практический результат эксперимента заключается в выявлении режима работы системы (проекция паттернов с частотой 20 Гц), при котором становится возможной надежная регистрация каждого изображения в стабильной фазе, без аппаратной синхронизации. Этот подход позволяет

существенно повысить качество съемки и обеспечить корректную реконструкцию при фазовой триангуляции в условиях ограниченного времени сканирования.

Заключение

В ходе проведенного исследования было проанализировано поведение различных типов проекторов при использовании в методе фазовой триангуляции в условиях высокоскоростной видеорегистрации. Особое внимание уделялось стабильности яркости, наличию мерцания и способности формировать четкое изображение фазовых паттернов при частоте съемки до 540 кадров в секунду.

Основной результат эксперимента заключается в том, что DLP-проектор, несмотря на его формально более высокую частоту обновления, демонстрирует выраженное мерцание и нестабильность яркости, что затрудняет его использование в задачах с повышенным временным разрешением без специальных синхронизирующих механизмов. В отличие от него, LCD-проектор (Everycom YG625), обладающий меньшей частотой проецирования, показал гораздо более стабильную картину освещения и более предсказуемое поведение при высокочастотной съемке.

Таким образом, можно сделать вывод, что при построении высокоскоростных 3D-систем на основе фазовой триангуляции в ряде случаев предпочтение следует отдавать LCD-проекторам, несмотря на их ограниченную кадровую частоту. Выбор оборудования должен базироваться не только на номинальных технических характеристиках, но и на экспериментальной проверке реального поведения источника света в условиях съемки. Представленные методики и полученные результаты могут быть использованы для оптимизации 3D-сканирующих систем, а также в задачах метрологии, промышленного контроля и биомеханики, где критична точность и стабильность фазовых измерений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров А.И., Иванов П.С. Влияние нестабильности источников света на точность 3D-реконструкции методом структурированного освещения // Оптико-механическая промышленность. – 2022. – № 5. – С. 45–50.

2. Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques // Optics and Lasers in Engineering. – 2010. – Vol. 48. – P. 149–158.

3. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial // Advances in Optics and Photonics. – 2011. – Vol. 3. – P. 128–160.

4. Salvi J., Fernandez S., Pribanic T., Llado X. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43(8). – P. 2666–2680.

5. Häusler G. A 3D sensor based on phase measuring triangulation // Optics and Lasers in Engineering. – 2001. – Vol. 36(2). – P. 103–124.

© С. В. Какаулин, И. К. Кабардин, 2025

УДК 533.69.01
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-109-113

С. В. Какаулин[1]✉, И. К. Кабардин[1]

Оценка устойчивости регистрации изображений при вариации временного разрешения источников и приемников в методе фазовой триангуляции

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается проблема устойчивости регистрации изображений при использовании метода фазовой триангуляции в условиях высокоскоростного 3D-сканирования. Основной акцент сделан на исследовании временных характеристик компонентов системы – проектора и видеокамеры и их влиянии на качество регистрации фазовых паттернов. Предложен экспериментальный подход к оценке фактической частоты обновления проектора с использованием фотоприемника и осциллографа, а также реализована съемка структурированного света с помощью высокоскоростной камеры при частоте до 540 кадров в секунду. Проведен анализ взаимной синхронизации устройств при работе проектора на частоте 120 Гц. Разработана методика подбора момента съемки, позволяющая исключить переходные состояния и обеспечивать захват стабильных изображений. Полученные результаты позволяют сократить время одного цикла 3D-сканирования методом фазовой триангуляции за счет надежной временной координации проекции и регистрации паттернов.

Ключевые слова: 3D-сканирование, фазовые паттерны, метод фазовой триангуляции

S. V. Kakaulin[1]✉, I. K. Kabardin[1]

Evaluation of the stability of image registration with variations in the time resolution of sources and receivers using the phase triangulation method

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kakaulin_sergei@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of image registration stability when using the phase triangulation method in conditions of high-speed 3D scanning. The main focus is on the study of the time characteristics of the system components – the projector and the video camera and their impact on the quality of recording phase patterns. An experimental approach to estimating the actual refresh rate of a projector using a photodetector and an oscilloscope is proposed, and structured light is captured using a high-speed camera at up to 540 frames per second. An analysis of the mutual synchronization of devices during the operation of the projector at a frequency of 120 Hz is carried out. A technique has been developed for selecting the moment of shooting, which makes it possible to exclude transition states and ensure stable image capture. The results obtained make it possible to reduce the time of one cycle of 3D scanning by phase triangulation due to reliable temporal coordination of projection and registration of patterns.

Keywords: 3D scanning, phase patterns, phase triangulation method

Введение

Метод фазовой триангуляции является одним из наиболее точных и широко используемых подходов в системах активного 3D-сканирования. Он основан на проекции на объект серии структурированных (обычно синусоидальных) паттернов и регистрации искажений этих паттернов с помощью видеокамеры. По фазовому сдвигу между зарегистрированными изображениями можно вычислить глубину сцены с высокой точностью. Однако одной из основных проблем, ограничивающих применение этого метода в задачах, требующих высокой скорости, остается временная несогласованность между источником (проектором) и приемником (камерой). Эта несогласованность приводит к появлению переходных состояний в кадрах – частичной проекции паттернов, мерцанию и искажению фазовых градиентов, что делает невозможной корректную фазовую реконструкцию.

Современные камеры обладают высокой частотой съемки (до 500–1000 кадров в секунду и выше), что открывает перспективы значительного ускорения всего цикла 3D-сканирования. Однако при отсутствии аппаратной синхронизации с проектором и точной временной координации проекции паттернов съемка на высокой скорости может привести к еще большей нестабильности изображений. Таким образом, задача сокращения времени на сканирование до 1 секунды или менее требует не только высокоскоростного оборудования, но и глубокого понимания и управления временными характеристиками системы.

В данной работе проводится комплексное исследование влияния временного разрешения и согласованности компонентов системы фазовой триангуляции на стабильность захвата изображений. С использованием фотоприемника и осциллографа измеряется фактическая частота обновления проектора, и фиксируются возможные нестабильности. Параллельно проводится высокоскоростная съемка проецируемых паттернов камерой с частотой до 540 кадров в секунду, что позволяет в реальном времени проанализировать переходные процессы при смене паттернов. В процессе экспериментов разрабатывается и реализуется методика определения и оптимизации временного смещения (capture offset), позволяющая регистрировать только стабильные кадры без переходов.

Результаты эксперимента демонстрируют возможность устойчивой съемки фазовых паттернов даже при высокой скорости проекции, что является важным шагом к реализации быстродействующих 3D-сканеров на базе метода фазовой триангуляции.

Экспериментальная установка, материалы и методики экспериментов

Экспериментальная установка для исследования устойчивости регистрации изображений в методе фазовой триангуляции была собрана на базе высокоскоростной камеры и цифрового проектора. В качестве источника структурированного света использовался DLP-проектор, способный воспроизводить чередующиеся паттерны с частотой до 120 Гц. На проектор подавались как бинарные (черно-белые), так и градиентные фазовые изображения. Регистрация изображе-

ний осуществлялась монохромной камерой, работающей в режиме съемки с высокой частотой кадров – до 540 FPS, с отключенной автоэкспозицией, фиксированной экспозицией и усилением. Для оценки временных характеристик проекции дополнительно применялись фотоприемник и цифровой осциллограф, с помощью которых фиксировалась длительность развертки и фактическая частота обновления изображения на выходе проектора.

Съемка выполнялась на фоне матовой диффузной поверхности, находящейся в фокусе объектива камеры. В процессе экспериментов проектор и камера функционировали без аппаратной синхронизации, что позволяло моделировать реалистичные условия, при которых возможно возникновение временных рассинхронизаций и переходных состояний. Запись производилась сериями по 200–500 кадров, что позволяло охватить несколько полных циклов чередования паттернов.

После съемки проводилась программная обработка данных: вычислялась средняя яркость каждого кадра, строился временной график изменения яркости, анализировалась его структура. С помощью алгоритмов поиска экстремумов на основе адаптивных порогов выделялись устойчивые плато яркости, соответствующие стабильному отображению черных и белых паттернов. Из каждого цикла автоматически выбирались по одному кадру для каждого состояния – с максимальной и минимальной яркостью. Эти кадры сохранялись в отдельную директорию, дополнительно визуализировались в виде гистограммы яркостей и помечались на общем графике.

В рамках серии экспериментов варьировались параметры как проекции (частота смены паттернов), так и съемки (экспозиция камеры, момент захвата кадра внутри цикла – capture offset). Это позволило выявить диапазоны, при которых достигается устойчивая регистрация изображений без искажений, связанных с переходными фазами проекции. Полученные данные легли в основу выбора оптимальных параметров системы для высокоскоростного 3D-сканирования методом фазовой триангуляции.

Результаты

В результате проведенных экспериментов была подтверждена высокая чувствительность метода фазовой триангуляции к временной согласованности между проектором и камерой. При отсутствии аппаратной синхронизации и использовании высокочастотной видеосъемки удалось эмпирически выделить диапазон частот проекции, в котором возможно стабильное извлечение кадров, свободных от переходных искажений.

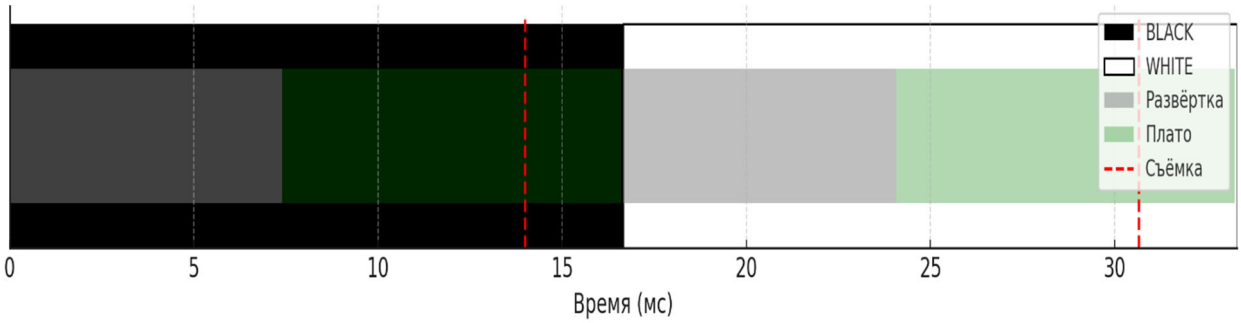


Рис 1. Временная диаграмма: смена паттернов при 30 Гц, offseet 14 мс. Первый паттерн – черный (слева); второй – белый (справа); серый блок – развертка (~7,4 мс); зеленый блок – стабильное плато (~9,2 мс); красная пунктирная линия – момент съемки (capture_offset_ms = 14)

Наиболее устойчивое поведение системы наблюдалось при установке частоты проектора на 20 Гц. В этих условиях один паттерн отображается на протяжении 50 мс, из которых более 40 мс приходятся на стабильную фазу проекции. Это позволяет с высокой надежностью захватывать изображения в моменты, когда паттерн полностью сформирован на экране. Проведенная съемка при 539.96 FPS и последующий анализ яркости каждого кадра показали наличие четких плато, соответствующих стабильному отображению черных и белых изображений. Автоматизированный выбор по одному кадру из каждого плато позволил формировать серию устойчивых снимков, пригодных для фазовой обработки без дополнительных коррекций.

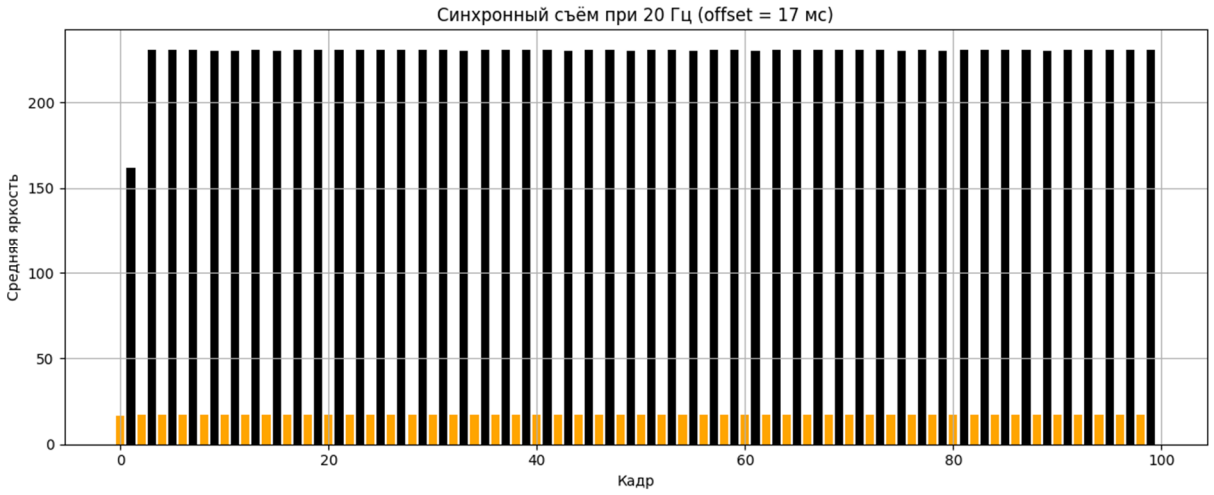


Рис. 2. График яркости с «capture offset» 17 мс. Регистрация белых (черные столбики) и черных (желтые столбики) паттернов.

При увеличении частоты проекции (30–60 Гц) наблюдалось значительное сокращение временного интервала стабильной проекции, в результате чего доля переходных кадров возрастала, а плато становились менее выраженными. Особенно критичным становилось это поведение при 60 Гц: стабильная часть кадра составляла менее 1 мс, что затрудняло точное попадание камеры в нужный временной интервал даже при использовании capture offset.

Таким образом, основной практический результат эксперимента заключается в выявлении режима работы системы (проекция паттернов с частотой 20 Гц), при котором становится возможной надежная регистрация каждого изображения в стабильной фазе, без аппаратной синхронизации. Этот подход позволяет существенно повысить качество съемки и обеспечить корректную реконструкцию при фазовой триангуляции в условиях ограниченного времени сканирования.

Заключение

В ходе проведенного исследования была продемонстрирована возможность устойчивой регистрации фазовых паттернов при отсутствии аппаратной синхронизации между проектором и камерой за счет точного подбора временных параметров съемки. Установлено, что при частоте проекции 20 Гц удается стабильно извлекать кадры, полностью соответствующие проецируемым паттернам, без искажений, вызванных переходными состояниями. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для ускоренного 3D-сканирования методом фазовой триангуляции.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зуев В. О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов// Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Vol. 30. – P.121–126.

2. Гнездилов И. М., Васильев Д.В., Разработка системы 3D-сканирования с использованием метода фазовой триангуляции // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 837–843.

3. Шишкин А. Ю., Козлов С.В., Синхронизация источников и приемников в системах трехмерного сканирования методом проекционной фотограмметрии // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 2. – С. 72–78.

© С. В. Какаулин, И. К. Кабардин, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-114-120

К. С. Зубанов[1,2]✉, И. К. Кабардин[1], С. В. Двойнишников[1], В. Г. Меледин[1]

Простой одночастотный дифференциальный оптический ЛДА

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Аннотация. В статье представлена усовершенствованная конструкция лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), в которой традиционные акустооптические модуляторы заменены компактным светоделительным кубом, а для детектирования сигналов применен кремниевый микропиксельный фотодетектор. Эксперименты включали измерения скорости частиц в потоке с использованием вращающегося диска с метками, а также тестирование системы на аэрозольных каплях, частицах дыма и в условиях затопленной струи. Результаты подтвердили линейную связь между доплеровской частотой и скоростью частиц с коэффициентом пересчета, стабильность которого не превышала 10% отклонения от среднего значения 101,6 кГц. Продемонстрирована возможность регистрировать сигнал на различных объектах, имитирующих частицы в физических экспериментах. Наибольшее отношение сигнал-шум (SNR) достигнуто для аэрозольных капель, тогда как в условиях погружной струи на качество данных влияли поглощение света и оптические искажения. Разработанная система демонстрирует возможность отказа от сложных компонентов, таких как ячейки Брэгга, без снижения точности. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией измерений для слаборассеивающих частиц и разработкой методов компенсации помех в погружных средах.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, светоделительный куб, микропиксельный фотодетектор

K. S. Zubanov[1,2]✉, I. K. Kabardin[1], S. V. Dvoynishnikov[1], V. G. Meledin[1]

Simple single-frequency differential optical LDA

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Abstract. The article presents an improved design of a laser Doppler anemometer (LDA), where traditional acousto-optic modulators are replaced with a compact beam-splitting cube, and a silicon micro-pixel photodetector is employed for signal detection. Experiments included velocity measurements of particles in a flow using a rotating disk with engraved markers, as well as system testing with aerosol droplets, smoke particles, and in submerged jet conditions. The results confirmed a linear relationship between the Doppler frequency and particle velocity, with a conversion factor demonstrating stability within 10% deviation from the mean value of 101.6 kHz. The system's ability to detect signals from various objects simulating particles in physical experiments was demonstrated. The highest signal-to-noise ratio (SNR) was achieved for aerosol droplets, while in submerged jet conditions, data quality was affected by light absorption and optical distortions. The developed system demonstrates the feasibility of eliminating complex components, such as Bragg cells. Future

research prospects are associated with optimizing measurements for low-scattering particles and developing methods to compensate for interference in submerged environments.

Keywords: laser Doppler anemometry, beam-splitting cube, micro-pixel photodetector

Введение

Лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) остается ключевым инструментом в экспериментальной гидродинамике с момента ее создания в 1964 г. [1]. Этот бесконтактный метод обеспечивает точное измерение скорости за счет регистрации доплеровского сдвига лазерного излучения, рассеянного движущимися частицами, и характеризуется высоким пространственным и временным разрешением [2]. За десятилетия метод ЛДА значительно эволюционировал, найдя применение в аэродинамике, исследованиях горения и мониторинге промышленных процессов [3, 4]. На сегодняшний день лазерная доплеровская анемометрия является одним из наиболее точных оптических методов измерения скорости частиц в потоках жидкостей, обеспечивая диагностику с погрешностью менее 0,1%. Сочетание высокой точности, широкого динамического диапазона и разрешения делает ее незаменимой для фундаментальных исследований турбулентности, верификации расчетных моделей вычислительной гидродинамики и анализа промышленных потоков, где традиционные методы недостаточно эффективны.

Современные разработки направлены на создание компактных и экономичных систем ЛДА без потери точности [5]. Классические конфигурации часто требуют сложных оптических схем с акустооптическими модуляторами (ячейками Брэгга) и объемными компонентами, что повышает стоимость и сложность юстировки. В данной работе предложена инновационная конструкция ЛДА на основе кубического делителя пучка, который формирует два когерентных лазерных пучка, исключая необходимость использования ячеек Брэгга и упрощая систему.

Важным элементом разработки стали кремниевые лавинные фотодетекторы с микропиксельной структурой, способные заменить современные фотоумножители в оптических схемах [6]. Производительность системы оценивалась на тестовых объектах, включая аэрозольные капли и частицы дыма, имитирующие типичные рассеивающие среды в гидродинамике. Такие измерения позволили проверить способность прибора работать с частицами различных размеров, форм и отражательными способностями.

Исследование отвечает растущему спросу на доступные и портативные системы для измерения скорости в научных и промышленных задачах. Использование современных оптических компонентов и упрощенной схемы позволяет повысить доступность лазерной анемометрии без ущерба для точности. Результаты работы способствуют развитию компактных и универсальных анемометров для исследований в области гидродинамики.

Методы и материалы

В данной работе скорость частиц измерялась в объеме пересечения двух лазерных пучков. Размер области измерения обычно составлял несколько милли-

метров в длину. Интенсивность света модулировалась вследствие интерференции между лазерными пучками, что привело к формированию параллельных плоскостей высокой интенсивности света – так называемых интерференционных полос. Расстояние между интерференционными полосами d_f зависит от длины волны лазерного излучения (λ) и угла между пучками (α):

$$d_f = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (1)$$

Сдвиг частоты при рассеянии света движущейся частицей однозначно определяется проекцией вектора скорости частицы $\vec{V}$ на вектор чувствительности $\vec{K}$ (рис. 1). Выражение для доплеровского сдвига частоты имеет вид:

$$\omega_D = 2kV\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos(\varphi). \quad (2)$$

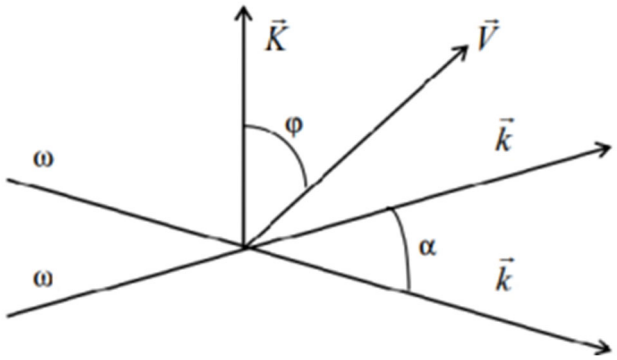


Рис. 1. Дифференциальная оптическая схема системы ЛДА

Оптическая схема прототипа лазерного доплеровского анемометра, использованного в данной работе и основанного на кубическом делителе пучка, представлена на рис. 2. Лазерный пучок от лазера (1) (λ = 660 нм, 150 мВт) направлялся на фокусирующую линзу (2), которая формировала перетяжку пучка в пространстве. Путем замены линзы и использования комбинаций рассеивающих и собирающих линз можно было регулировать положение перетяжки пучка вдоль лазерного луча, что необходимо для правильной юстировки прибора. После прохождения через кубический делитель пучка (3) (20×20×20 мм) лазерный пучок разделялся на два когерентных пучка с соотношением интенсивностей 1:3. Кубический делитель пучка задавал точку пересечения двух лазерных пучков. Затем разделенные пучки направлялись в исследуемую область потока. При пересечении в потоке лазерные пучки формировали интерференционную картину с известной пространственно-временной периодической структурой. Свет, рассе-

янный частицами, собирался объективом (4) и фокусировался через оптический фильтр (5) и апертуру (6) на фотодетектор (7) (микропиксельный лавинный кремниевый фотодетектор).

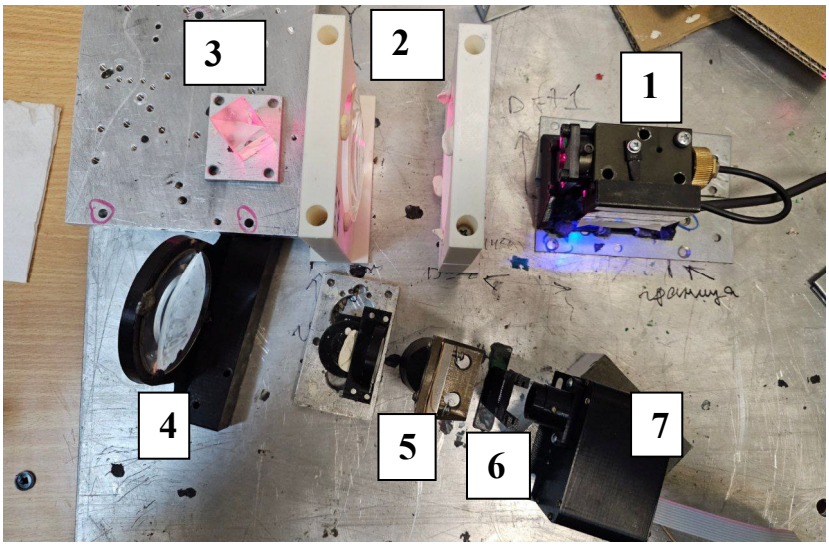


Рис. 2. Фотография макета лазерного доплеровского анемометра

Результаты

Эксперименты были проведены для проверки работоспособности оптической схемы лазерного доплеровского анемометра на основе кубического делителя пучка с микропиксельным лавинным кремниевым фотодетектором. Основной целью являлось исследование зависимости частоты доплеровского сигнала от скорости частиц в измерительном объеме. Для этого использовался вращающийся прозрачный диск с нанесенными метками. Скорость вращения регулировалась с помощью генератора частоты. Линейная скорость каждой метки, проходящей через измерительный объем, рассчитывалась на основе частоты вращения диска и его радиуса (R=5,3 см). Частота генератора варьировалась в диапазоне от 20 до 400 Гц, при этом одному полному обороту диска соответствовала частота 200 Гц. Полученная зависимость доплеровской частоты от скорости представлена на рис. 3.

График демонстрирует линейную зависимость между доплеровской частотой и скоростью. Однако, для прецизионных измерений ЛДА необходимо знать коэффициент преобразования доплеровской частоты в скорость. Данный коэффициент может быть получен из отношения доплеровской частоты к соответствующей скорости (рис. 4).

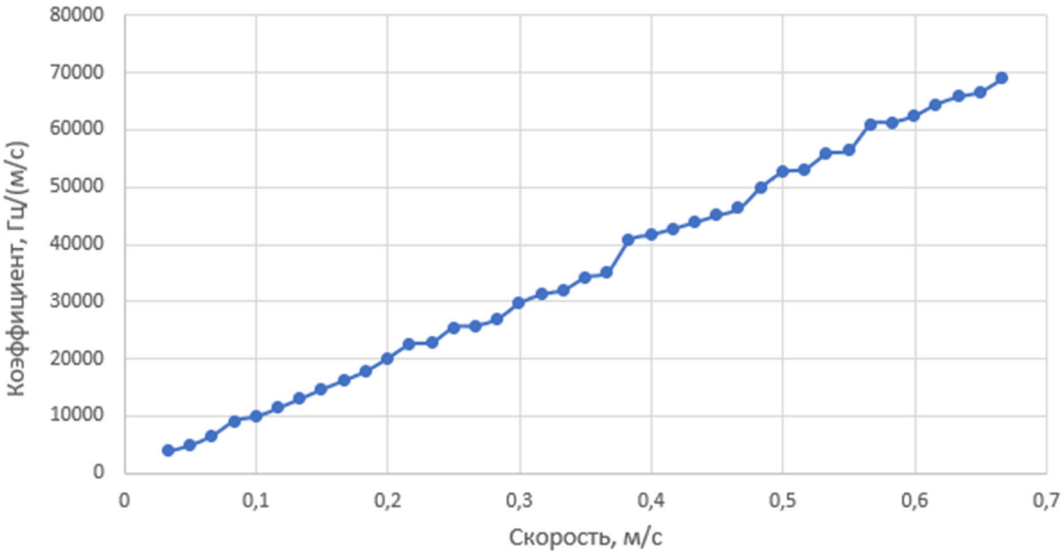


Рис. 3. Зависимость частоты доплервоского сигнала от скорости

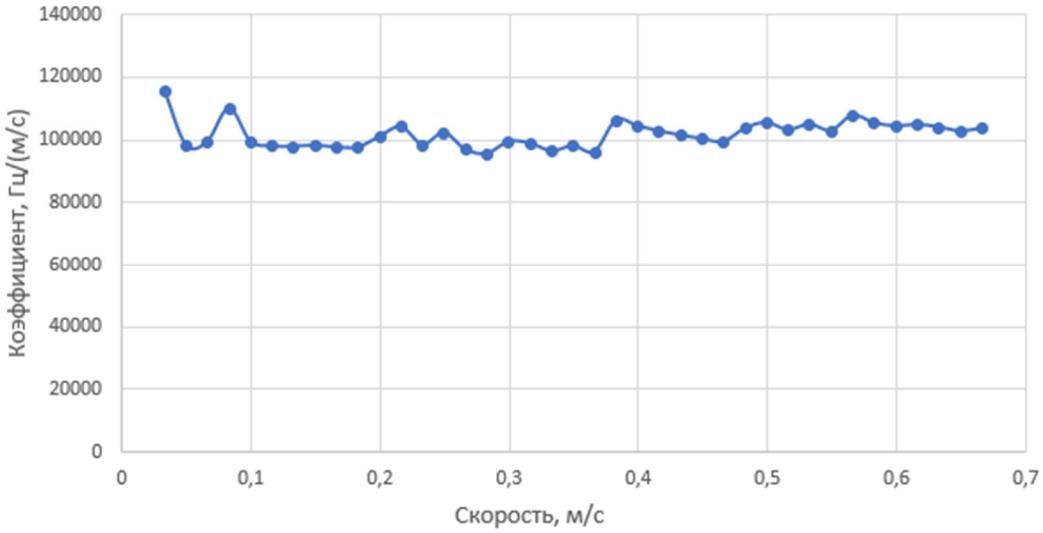


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования от скорости

Способность системы измерять скорости различных частиц была проверена на следующих объектах: капли воды из увлажнителя, частицы дыма, частицы в затопленной струе. На рис. 5 показаны доплеровские сигналы от этих тестовых объектов. Как обсуждалось ранее, капли из увлажнителя служили идеальными рассеивающими целями благодаря их высокой отражательной способности, обеспечивая сигналы более высокого качества. Отношение сигнал-шум (SNR) было наивысшим для аэрозольных капель и значительно ниже для частиц дыма. Хотя погружная струя создавала самые слабые сигналы, они оставались обнаруживаемыми.

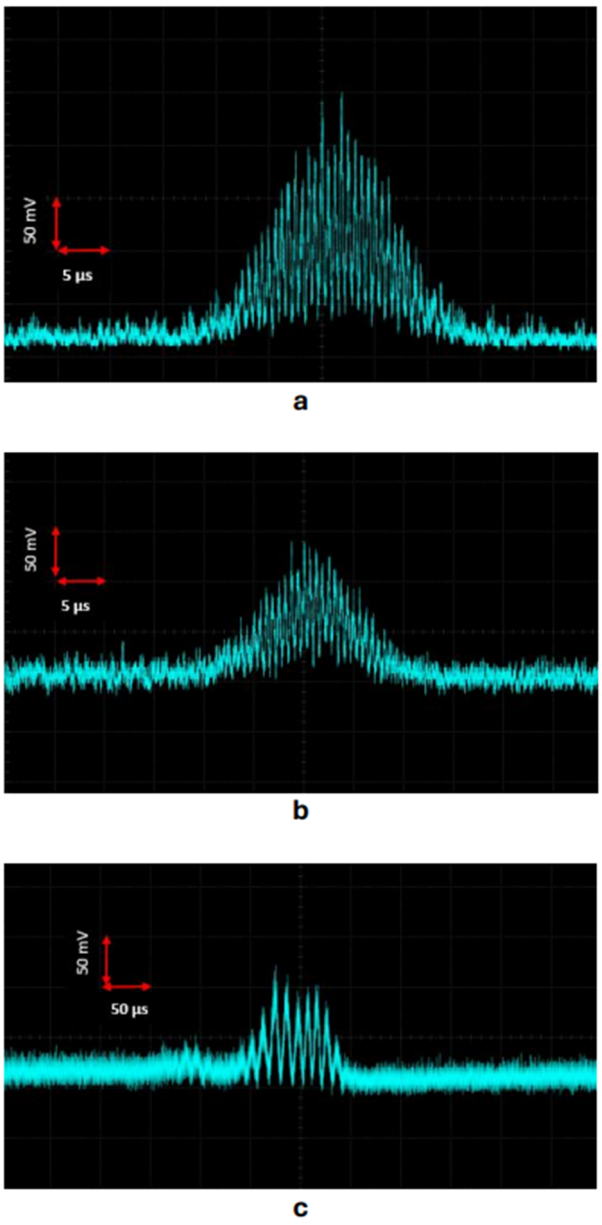


Рис. 5. Осциллограммы сигналов с различных тестовых объектов:
a) капли с увлажнителя воздуха; b) частицы дыма;
c) частицы в затопленной струе

Обсуждение

Разработанная оптическая схема ЛДА успешно регистрировала сигналы как от объектов с высокой отражательной способностью (капли из увлажнителя), так и с низкой (частицы дыма), демонстрируя линейную зависимость доплеровской частоты от скорости (рис. 3), что подтверждает работоспособность прототипа.

Кубический делитель пучка определяет угол пересечения лазерных пучков, регулируя количество интерференционных полос в измерительном объеме. Следовательно, его размеры критически важны для проектирования ЛДА. В свою очередь, отношение полезного сигнала к шуму может быть увеличено за счет

уменьшения полосы пропускания фотодетектора, однако ценой сокращения диапазона измеряемых скоростей.

Заключение

В данном исследовании успешно продемонстрирована работоспособность компактной системы лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), основанной на кубическом делителе пучка и микропиксельном лавинном фотодетекторе. Ключевым результатом является то, что данная упрощенная конфигурация обеспечивает точное измерение скоростей жидкостей, что подтверждается линейной зависимостью между доплеровской частотой и скоростью частиц при постоянном коэффициенте преобразования.

Эффективность системы подтверждается воспроизводимыми измерениями в различных условиях, включая успешную регистрацию сигналов как от идеальных рассеивающих целей (капли воды), так и от сложных объектов (частицы дыма).

Значимость результатов заключается в доказательстве возможности замены сложных ячеек Брэгга на простые оптические схемы без потери точности измерений. Это делает технологию ЛДА более доступной для образовательных и промышленных применений, где ключевыми факторами являются стоимость и простота.

Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке методики коррекции границ раздела для измерений за иллюминаторами и оптимизации оптической схемы для расширения диапазона измерений скоростей слаборассеивающих частиц. Эти улучшения повысят универсальность системы, сохранив ее преимущества в виде простоты и экономической эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yeh Y. and Cummins H. Z. 1964 Localized fluid flow measurements with a HeNe laser spectrometer Appl. Phys. Lett. 4 176–8.

2. Drain L. E. 1980 The Laser Doppler Technique (Chichester: Wiley).

3. Durst F, Melling A and Whitelaw J H 1976 Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry (London: Academic).

4. Tropea C 1995 Laser Doppler anemometry: recent developments and future challenges Meas. Sci. Technol. 6 605–19.

5. Czarske J 2006 Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources Meas. Sci. Technol. 17 R71–91.

6. V V Rakhmanov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012088.

© К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, С. В. Двойнишников, В. Г. Мелединн, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-121-127

К. С. Зубанов[1,2]✉, И. К. Кабардин[1], В. В. Рахманов[1], А. М. Оборин[1]

Оптимизация оптической схемы дифференциального оптического ЛДА

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск,Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Аннотация. В работе представлена компактная оптическая схема лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), в которой традиционные акустооптические модуляторы заменены светоделительным кубом, а для детектирования сигналов использован микропиксельный кремниевый фотоумножитель. Исследование направлено на адаптацию данной конструкции для реальных экспериментов, где ключевыми вызовами стали уменьшение амплитуды доплеровского сигнала на расстоянии, несовпадение лазерных пучков в измерительной области, а также зависимость интенсивности разделенных пучков от светоделительного куба. Эксперименты проводились с дымовыми частицами, что позволило оценить соотношение сигнал-шум (SNR). Результаты показали резкое снижение SNR на расстояниях до 500 мм, при этом замена транзисторов на операционные усилители в схеме фотоприемника повысила качество сигнала, сохранив достаточный диапазон измеряемых скоростей. Анализ точности сведения лазерных пучков выявил отклонения, вызванные несовершенством куба, расщепляющего луч, что потребовало коррекции с помощью плоскопараллельных пластин. Было исследовано влияние поляризации входного лазерного пучка на соотношение интенсивностей расщепленного пучка, которое варьировалось от 1:10 до 2:3 в зависимости от типа куба. На основе полученных данных предложен выбор оптимального расстояния до измерительной области, равного 400 мм. Предложен метод компенсации геометрических погрешностей. Разработанная схема сочетает компактность и экономическую эффективность, расширяя возможности применения ЛДА в образовательных и промышленных задачах, где критически важны мобильность и адаптивность измерительных систем.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, светоделительный куб, микропиксельный кремниевый фотоумножитель

K. S. Zubanov[1,2]✉, I. K. Kabardin[1], V. V. Rakhmanov[1], A. M. Oborin[1]

Optimization of the optical circuit of the differential optical LDA

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Abstract. This study presents a compact optical design of a laser Doppler anemometer (LDA), where traditional acousto-optic modulators are replaced by a beam-splitting cube, and a micro-pixel silicon photomultiplier is employed for signal detection. The research focuses on adapting this design for practical applications, addressing key challenges such as Doppler signal attenuation over distance, misalignment of laser beams in the measurement volume, and the dependency of split-beam intensity ratios on the beam-splitting cube's properties. Experiments conducted with smoke particles enabled evaluation of the signal-to-noise ratio (SNR), revealing a sharp decline in SNR at distances up to 500

mm. Replacing transistors with operational amplifiers in the photodetector circuit improved signal quality while preserving a sufficient measurable velocity range. Analysis of beam alignment accuracy highlighted deviations caused by beam-splitting cube imperfections, necessitating correction via plane-parallel plates. The influence of input laser polarization on split-beam intensity ratios was investigated, demonstrating variations from 1:10 to 2:3 depending on the cube type. Based on the findings, an optimal measurement distance of 400 mm is proposed, alongside a method to compensate for geometric inaccuracies. The developed system combines compactness and cost-effectiveness, expanding the applicability of LDA in educational and industrial settings where mobility and adaptability of measurement systems are critical.

Keywords: laser Doppler anemometry, beam-splitting cube, micro-pixel silicon photomultiplier

Введение

С момента своего появления в 1964 году [1], лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) заняла центральное место в экспериментальных исследованиях гидродинамических процессов. Данная технология, основанная на анализе доплеровского смещения частоты света, рассеянного движущимися частицами, обеспечивает неинвазивное измерение скоростей с пространственным разрешением на микронном масштабе и погрешностью ниже 0,1% [2]. Широкий динамический диапазон и высокая временная точность метода обусловили его применение в задачах аэродинамики, изучения турбулентности и контроля промышленных потоков [3, 4], где традиционные контактные методы демонстрируют ограниченную эффективность.

Современные тенденции развития ЛДА связаны с миниатюризацией систем и снижением их стоимости без ущерба для метрологических характеристик [5]. Классические схемы, использующие акустооптические модуляторы (ячейки Брэгга) и громоздкую оптику, постепенно уступают место компактным решениям. В данной работе представлена оптимизированная конструкция лазерного доплеровского анемометра, в которой роль ключевых компонентов выполняют светоделительный кубик – замена ячейки Брэгга, формирующий интерференционную картину, и микропиксельный кремниевый фотоумножитель, обеспечивающий высокочувствительное детектирование.

Основной целью работы исследования является адаптация данной оптической схемы для работы в условиях реальных экспериментов. Однако замена традиционных элементов выявила новые вызовы. К ним относятся:

– ограничение дальности измерений из-за падения амплитуды сигнала при увеличении расстояния до измерительной области;

– несовпадение лазерных пучков, разделенных светоделительным кубиком, в точке пересечения – измерительной области.

Для исследования системы проведены эксперименты с дымовыми частицами. Особое внимание уделено анализу соотношения сигнал-шум (SNR) и эффектам, возникающим при использовании светоделительного куба для деления лазерного луча на два когерентных пучка.

Данное исследование позволяет понять ограничения и возможности использования представленной в работе оптической схемы для применения ЛДА в об-

разовательных и промышленных сценариях, где критически важны мобильность и экономическая эффективность.

Методы и материалы

Оптическая схема прототипа лазерного доплеровского анемометра, использованного в данной работе и основанного на кубическом делителе пучка, представлена на рис. 1. Лазерный пучок от лазера (1) (λ = 660 нм, 150 мВт) направлялся на фокусирующую линзу (2), которая формировала перетяжку пучка в пространстве. Путем замены линзы и использования комбинаций рассеивающих и собирающих линз можно было регулировать положение перетяжки пучка вдоль лазерного луча, что необходимо для правильной юстировки прибора.

После прохождения через кубический делитель пучка (3) (20×20×20 мм) лазерный пучок разделялся на два когерентных пучка с соотношением интенсивностей 1:3. Кубический делитель пучка задавал точку пересечения двух лазерных пучков. Затем разделенные пучки направлялись в исследуемую область потока. При пересечении в потоке лазерные пучки формировали интерференционную картину с известной пространственно-временной периодической структурой. Свет, рассеянный частицами, собирался объективом (4) и фокусировался через оптический фильтр (5) и апертуру (6) на фотодетектор (7) (микропиксельный лавинный кремниевый фотодетектор).

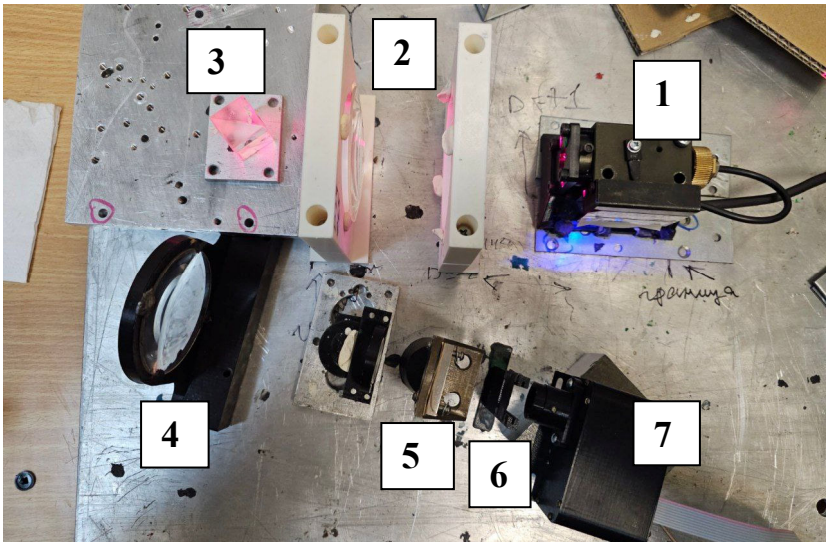


Рис. 1. Фотография оптической схемы ЛДА

Для исследования сведения в точку двух лазерных пучков, которые получаются на выходе из светоделительного куба, использовалась схема, представленная на рис. 2. Устанавливался He-Ne лазер, перед которым располагался светоделительный куб. Лазерный луч, попадающий на куб, делился на два когерентных пучка, которые сводились на экране в точку путем поворота светоделительного куба.



Рис. 2. Схема исследования сведения двух лазерных пучков в точку

Результаты

Было исследовано отношение полезного доплеровского сигнала к шуму на различных расстояниях между светоделительным кубом и измерительной областью (рис. 3, 4). Для перемещения перетяжки лазерного луча в измерительную область каждый раз подбиралась комбинация двух линз (рис. 1).

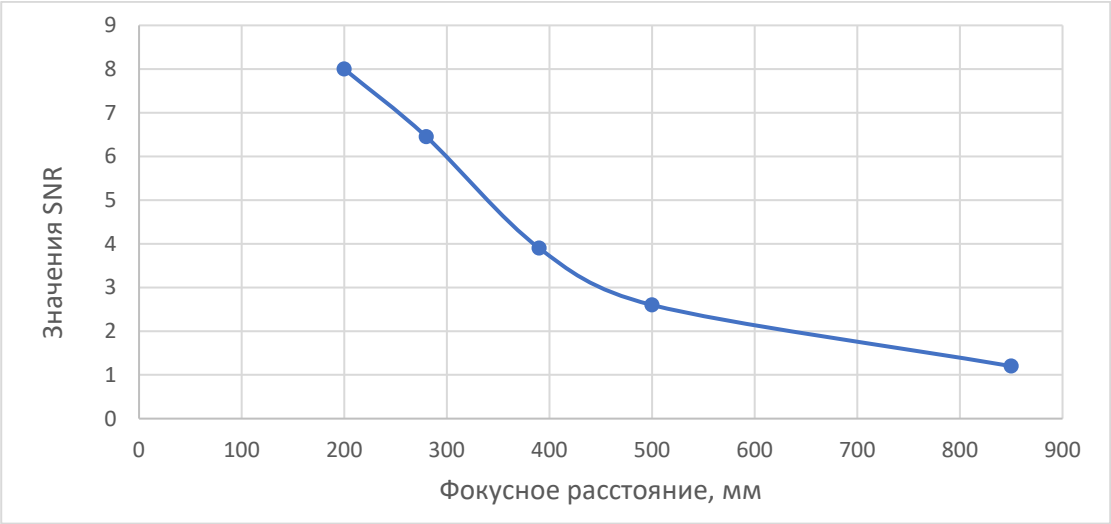


Рис. 3. Зависимость SNR от дальности измерительной области для схемы фотоприемника на основе транзисторов

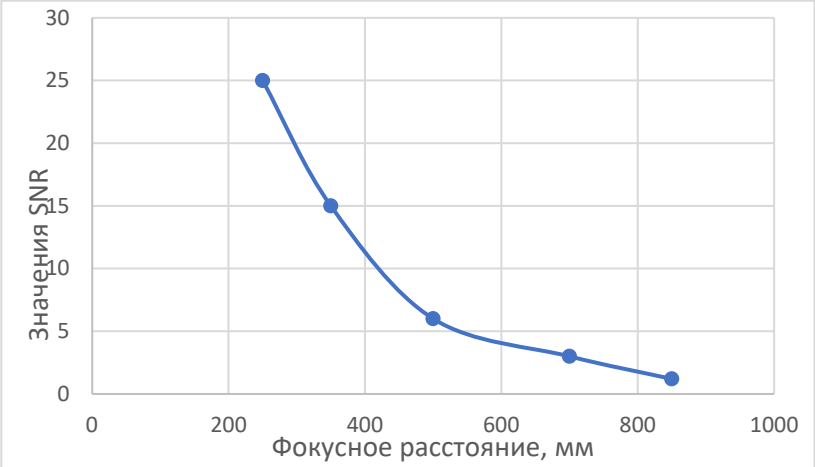


Рис. 4. Зависимость SNR от дальности измерительной области для схемы фотоприемника на основе операционных усилителей

Представленные выше зависимости отношения доплеровского сигнала к шуму имеют схожую зависимость от расстояния между светоделительным кубом и измерительной областью. При этом, SNR для фотоприемника на основе операционных усилителей имеет значения больше, чем для схемы на транзисторах. Связано это с тем, что ширина полосы пропускания оказывается меньше. При этом диапазон значений скорости, которые возможно измерить, используя фотоприемник с операционными усилителями в схеме, оказывается также меньше, но все еще достаточным для большинства физических экспериментов.

Полученные данные говорят о том, что отношение сигнала к шуму для данной оптической схемы (рис. 1), резко уменьшается в диапазоне от 200 мм до 500 мм. Затем наступает область, где спад продолжается, но он уже является более плавным. Для настройки оптической схемы расстояние между светоделительным кубом и измерительной областью свыше 500 мм является неоптимальным.

Также была проверена точность сведения двух разделенных пучков светоделительным кубом в одну точку. Данный фактор является очень важным, так как напрямую влияет на построение измерительной области и интерференционной картины.

Были проверены три различных светоделительных куба. Один из них сводил пучки точно в точку. Для остальных двух было замечено расхождение пучков в точке пересечения. Как можно заметить на фотографиях (рис 5.), один из лучей находится чуть выше другого, что может сильно сказываться на создании интерференционной картины в измерительной области. Чтобы это исправить, необходимо использовать плоскопараллельные пластины для изменения направления одного из лучей.

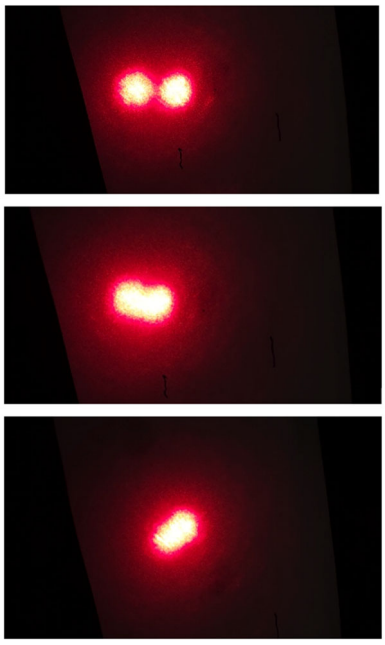


Рис. 5. Изменения положение лучей друг относительно друга
в пределах измерительной области (на фотографиях и
значально левая точка движется в правую сторону)

Также было проверено то, как различные светоделительные кубы делят исходный луч на два по интенсивности. Данные эксперименты были выполнены на

He-Ne лазере с использованием светоделительных кубов (рис. 2), с поставленными поляризаторами до и после куба.

Изначально задавалась либо вертикальная, либо горизонтальная поляризация относительно куба (рис. 6), а на выходе, путем поворота поляризатора, проверялась выходная поляризация. Было необходимо, чтобы поляризация на выходе совпадала у обоих лучей. Как оказалось, для различных светоделительных кубов, входная поляризация определяет интенсивности выходных лучей по-разному. На одном кубе горизонтальная поляризация позволяет добиться отношения интенсивности двух лучей, равного 2/3, тогда как вертикальная поляризация на входе может сделать данное отношение 1/10 или еще меньше.

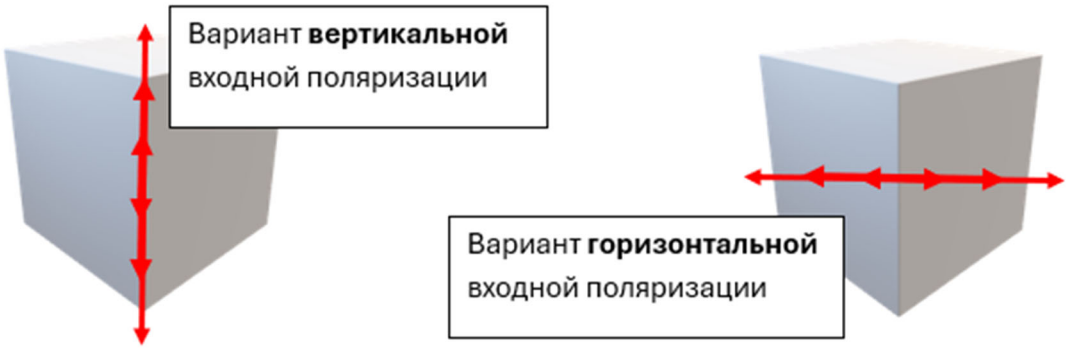


Рис. 6. Положение поляризации лазерного луча
на входе в светоделительный куб

Обсуждение

Переход с транзисторов на операционные усилители в схеме фотоприемника позволил значительно увеличить отношение доплеровского сигнала к шуму. В связи с этим было решено: для того, чтобы выстраивать в дальнейшем оптическую схему, расстояние 400 мм между точкой пересечения лучей и светоделительным кубом является оптимальным.

Как оказалось, различные светоделительные кубы могут сводить два пучка в точку неидеально. Данный фактор зависит от самого светоделительного куба, и может лишь быть нивелирован путем добавления в схему плоскопараллельных пластин. Либо необходимо подбирать такие кубы, которые идеально сводят лучи в точку, что, в свою очередь, может стать проблемой при создании ЛДА с использованием подобной схемы.

Также необходимо производить проверку каждых новых светоделительных кубов на деление исходного луча по интенсивностям. Отношение 1 к 1 является самым лучшим. В свою очередь, такой результат можно получить при использовании дополнительного поляризатора в схеме, но при этом общая интенсивность окажется меньше.

Заключение

Было исследовано отношение полезного доплеровского сигнала к шуму (SNR) для представленной оптической схемы дифференциального лазерного доплеровского анемометра на основе светоделительного куба. Замечен резкий спад данного значения в области до 500 мм, тогда как после спад более плавный.

Для различных светоделительных кубов была проверена возможность сводить два разделенных пучка ровно в точку в области пересечения лучей. Необходимо закладывать возможность для компенсации неточного пересечения лучей в измерительной области путем наклона плоскопараллельных пластин на выходе из светоделительного куба.

Было проверено деление одного луча на два пучка по интенсивностям для различных светоделительных кубов. Отношение интенсивностей двух лучей, образующих измерительную область, зависит от самого светоделительного куба. Необходимо выбрать какую поляризацию луча на входе куба использовать – вертикальную или горизонтальную. Таким образом, необходимо анализировать каждый светоделительный куб и выбирать наилучший случай, когда отношение интенсивностей выходных лучей максимально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yeh Y and Cummins H Z 1964 Localized fluid flow measurements with a HeNe laser spectrometer Appl. Phys. Lett. 4 176–8.

2. Drain L E 1980 The Laser Doppler Technique (Chichester: Wiley).

3. Durst F, Melling A and Whitelaw J H 1976 Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry (London: Academic).

4. Tropea C 1995 Laser Doppler anemometry: recent developments and future challenges Meas. Sci. Technol. 6 605–19.

5. Czarske J 2006 Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources Meas. Sci. Technol. 17 R71–91.

© К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, В. В. Рахманов, А. М. Оборин, 2025

УДК 532.5, 53.05
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-128-132

М. В. Кашкарова[1]✉, Д. В. Литвинова[1], А. Ю. Кравцова[1]

Цифровой двойник течения вязкой жидкости в т-миксере при неодинаковых расходах во входных каналах

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Аннотация. В технологических процессах для получения смесей зачастую используют микромиксеры различных конфигураций. Преимущество таких устройств заключается в их простоте, а перемешивание происходит за счет особой геометрии канала. Основная часть исследований по данной тематике ориентирована на разработку методов, направленных на повышение эффективности смешивания в микроканалах. Так, например, в [1] исследуется влияние угла изгиба выходного канала на коэффициент перемешивания. Рабочей жидкостью в большинстве работ выступает вода. При этом, в реальных технологических процессах физические свойства смешиваемых жидкостей могут отличаться. В данной работе исследовалось влияние вязкости рабочей жидкости на течение в т-микроканале, и проанализировано влияние неодинаковых расходов на картину течения. Моделирование проводилось в CFD-пакете STAR CCM+.

Ключевые слова: микромиксер, неодинаковые расходы, число Рейнольдса, нестационарный поток, коэффициент перемешивания

M. V. Kashkarova[1]✉, D. V. Litvinova[1], A. Yu. Kravtsova[1]

Digital twin of viscous liquid flow in a t-mixer at different flow rates in the input channels

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Abstract. In technological processes, micromixers of various configurations are used to produce mixtures. The advantage of such devices lies in their simplicity, and mixing occurs due to the special geometry of the channel. The main part of the research on this topic is aimed at developing methods directed to improving the efficiency of mixing in microchannels. For example, in [1] the influence of the bending angle of the output channel on the mixing coefficient is investigated. The working fluid in most cases is water. In real technological processes, the physical properties of the mixed liquids may differ. In this paper, the effect of the viscosity of the working fluid on the flow in the t-micromixers was investigated and the effect of unequal flow rates on the flow pattern was analyzed. The simulation was carried out in the CFD package STAR CCM+.

Keywords: micromixer, unequal flow rates, Reynolds number, unsteady flow, mixing coefficient

Введение

Чаще всего для исследования течений в лабораторных условиях в качестве рабочей жидкости используют дистиллированную воду. Физические свойства рабочих жидкостей, используемых в реальных технологических процессах, мо-

гут достаточно сильно отличаться от свойств воды. Также, реальные производственные технологии могут предполагать смешивание веществ в различных пропорциях. Один из вариантов реализации такого технологического процесса представлен в [2], где исследуются миксеры различного сечения. Такой способ предполагает изготовление нового микромиксера под конкретный технологический процесс. Другим способом реализации смешивания веществ в разных пропорциях является изменение величины расходов во входных каналах, что позволяет избежать дополнтельных издержек.

В работе проведено сравнение течений вязкой и маловязкой жидкости в микроканале. Построены λ_2-изоповерхности, поля концентраций и линии тока. Проведено сравнение протяженности λ_2-структур при различных соотношениях расходов во входных каналах.

Методы и материалы

Расчетные области, используемые в моделировании, были построены в соответствии с размерами применяемых в реальных технологических условиях микромиксеров. Область течения представляла собой Т-образную призму размерами 120×120×240 мкм. В качестве рабочих жидкостей рассматривались вода (плотность – 1000 кг/м^3, вязкость – $8{,}90\cdot10^{-4}$ Па·с) и водный раствор глицерина 30% (плотность – 1076,5 кг/м^3, вязкость – 0,001432 Па·с). Основной характеристикой потока жидкости в микроканале является число Рейнольдса $\mathrm{Re} = U_0 D_h/\nu$, где U_0 – средняя скорость потока в выходном канале, D_h = 160 мкм – гидравлический диаметр выходного канала, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Для моделирования течения в микромиксере использовался CFD-пакет STAR CCM+. Для описания течения вязкого потока были выбраны нестационарные уравнения Навье-Стокса. Рабочая жидкость имела постоянную вязкость и плотность. Обе жидкости, которые подавались во входные каналы, имели одинаковые физические свойства. Среда рассматривалась как взаимопроникающий континуум с общим полем давления. Поток считался ламинарным.

В качестве граничных условий на стенках были использованы условия прилипания. Во входах канала задавались значения массового расхода, с учетом того, что отношение расходов в первом и втором входном каналах принимало определенное значение. Величины расходов в первом и втором входных каналах задавались с помощью выражений:

$$Q_1 = \frac{RQ}{1+R}, \quad Q_2 = \frac{Q}{1+R},$$

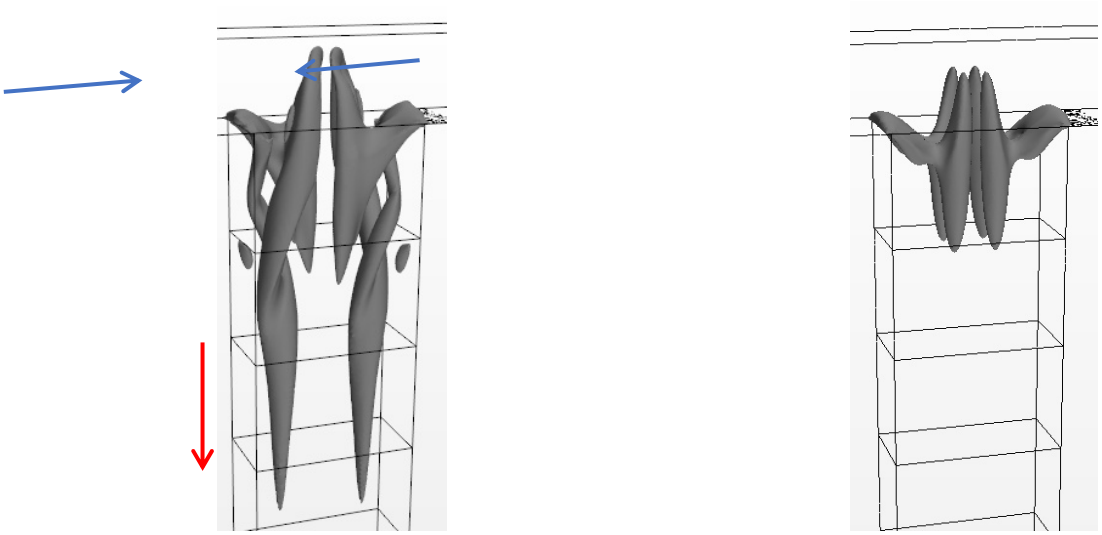
где $Q = \frac{\mathrm{Re}\nu S}{D_h}$; S – площадь сечения выходного канала; R характеризует отношение меньшего значения входного расхода к большему:

$$R = \frac{Q_1}{Q_2}.$$

На выходе из микроканала ставилось условие свободного истечения. Геометрия расчетной области совпадала с конфигурацией канала: два коллинеарных входных канала квадратного сечения с гранью размером 120 мкм сходятся в один выходной прямоугольный канал размером 120×240 мкм. Длина каждого из входных каналов 1,2 мм, длина выходного 2,4 мм. Угол между каждым из входных и выходным каналами составлял 90°. Расчетная сетка состояла из многогранных ячеек, в области слияния потоков ячейки сетки были дополнительно измельчены.

Результаты

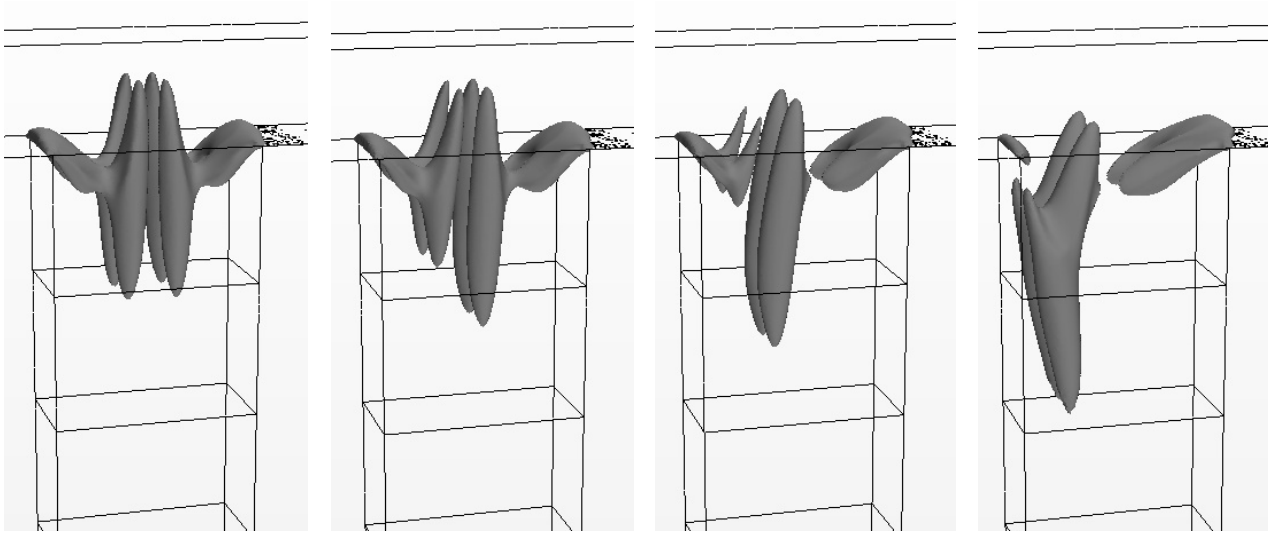
В результате сравнений λ_2-изоповерхностей для вязкой и невязкой рабочих жидкостей получили, что в вязкой жидкости вихревые структуры намного менее развиты. Так, если в воде протяженность «ножек» изоповерхности составляет $3D_h$, то в водном растворе глицирина (30%) протяженость составляет всего лишь $1D_h$ (рис. 1). Течения в случае обеих рабочих жидкостей являются стационарными.



а) *б*)

Рис. 1. Влияние вязкости рабочей жидкости на форму λ_2-изоповерхности в т-микромиксере. Re = 120, R = 1. (а) – вода, (б) – водный раствор глицерина (30%). Стрелками указаны направления потока

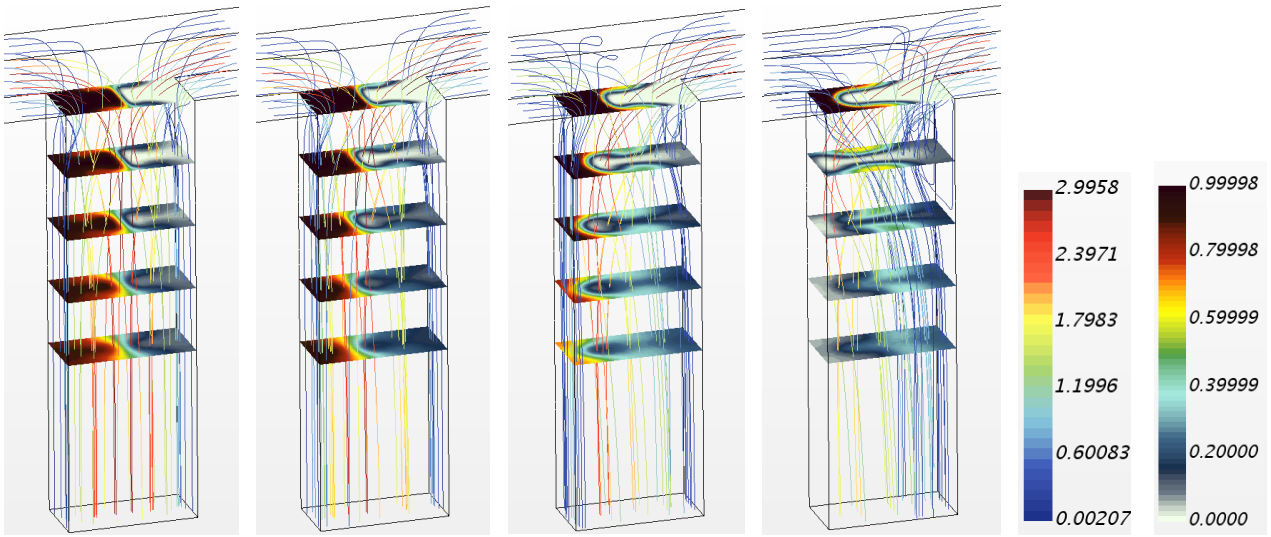
Исследована также динамика изоповерхности при изменении величины соотношения входных расходов. При уменьшении величины R изоповерхность теряет свою симметричность, и положение «ножек» смещается в сторону канала с меньшим расходом (рис. 2).



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2. Динамика изменения λ_2-изоповерхности при уменьшении параметра R: (а) – R = 1; (б) – R = 0,75, (в) – R = 0,5, (г) – R = 0,25.

Для анализа течения в выходном канале при различных соотношениях R были построены линии тока и поля концентраций в выходном канале микромиксера (рис. 3).



а) *б*) *в*) *г*) *д*) *е*)

Рис. 3. Линии тока и поля концентраций в потоке водного раствора глицерина (30%) при различных соотношениях расходов во входных каналах: (а) – R = 1, (б) – R = 0,75, (в) – R = 0,5, (г) – R = 0,25. Шкалы: (д) – шкала для значений скорости, показанных на линиях тока, (е) – шкала концентраций, показанных в поперечных сечениях выходного канала, расстояние между сечениями равно D_h.

При уменьшении параметра R максимум скорости потока смещается в сторону к каналу с меньшим расходом (рис. 4).

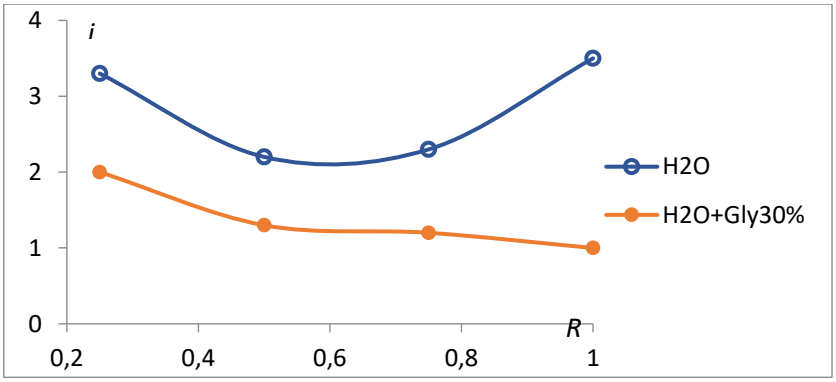


Рис. 4. Зависимость протяженности «ножек» λ_2-изоповерхности в потоке воды и водного раствора глицерина (30%) при различных соотношениях расходов (i – коэффициент протяженности «ножек», iD_h, i=1..4).

Еще одним критерием влияния вязкости рабочей жидкости на поток является то, что в случае маловязкой жидкости (воды) протяженность «ножек» при уменьшении параметра R сначала уменьшается, а затем растет. В вязкой жидкости происходит постоянный рост протяженности «ножек».

Заключение

В работе с помощью компьютерного моделирования проведено сравнение течения вязкой и маловязкой рабочих жидкостей в т-микромиксере. Описана динамика изменения λ_2-изоповерхности при изменении величины соотношения входных расходов R. Для более глубокого анализа течения в микроканале были построены поля концентраций и линии тока для различных R. Проведен сравнительный анализ протяженности «ножек» изоповерхности для случаев вязкой и маловязкой жидкости. В вязкой жидкости при уменьшении значения R происходит рост протяженности «ножек», тогда как в случае воды происходит сначала уменьшение, а затем рост протяженности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rasheed, K., Ansari, M.A., Alam, S. et al. Performance analysis of T-shaped micromixers using an innovative bend structure of mixing channel. Microfluid Nanofluid 29, 6 (2025). https://doi.org/10.1007/s10404-024-02783-3.

2. B. Li, J. Hou, K. Xu, Q. Gao, M. Zeng, Q. Wang. Optimal designs for flow uniformity at inlet of microchannel flat tube heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Volume 226, 2023, 120300, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120300.

© М. В. Кашкарова, Д. В. Литвинова, А. Ю. Кравцова, 2025

УДК 532.5, 53.05
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-133-137

М. В. Кашкарова[1]✉, А. Ю. Кравцова[1]

Визуализация λ_2-изоповерхностей вязкой жидкости в т-микроканалах при наложенных пульсациях

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Аннотация. Одним из устройств для перемешивания жидкостей является Т-микромиксер. Исследования течений в Т-микромиксерах направлены на поиск различных методов повышения эффективности перемешивания в них. Так, к пассивным методам повышения эффективности работы устройств относится изменение конфигурации, а именно размера каналов [1]. Одним из активных методов является применение дополнительных пульсаций расхода во входных потоках [2]. Одновременно с этим, реальные жидкости в технологических процессах могут обладать различными физическими свойствами, отличными от свойств воды, которая чаще всего применяется в качестве рабочей жидкости в большинстве работ по исследованию течений в микроканалах. В работе проведено исследование поведения вязкой жидкости (30% раствор глицерина) в микроканале при наложенных пульсациях на входах. Варьировались значения частот пульсаций и числа Рейнольдса. Получены λ_2-изоповерхности и поля концентраций в Т-микроканале. Проведено сопоставление течений при различных параметрах потока.

Ключевые слова: Т-микроканал, пульсации, λ_2-изоповерхности, число Рейнольдса

M. V. Kashkarova[1]✉, A. Yu. Kravtsova[1]

Visualization of λ_2-isosurfaces of viscous liquid in t-microchannels with superimposed pulsations

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Abstract. One of the devices for mixing liquids is a T-micromixer. Studies of flows in T-micromixers are aimed at finding various methods to increase the efficiency of mixing in them. Thus, passive methods of increasing the efficiency of devices include changing the configuration, namely the channel size [1]. One of the active methods is the use of additional flow pulsations in the input streams [2]. At the same time, real liquids in technological processes may have different physical properties than water, which is most often referred to as working fluid in most studies of microchannels. The paper investigates the behavior of a viscous liquid (30% glycerol solution) in a microchannel with superimposed pulsations at the inputs. The values of the pulsation frequencies and the Reynolds number varied. λ_2- isosurface and concentration fields in the T-microchannel are obtained. A comparison of currents at different parameters is carried out.

Keywords: T-microchannel, superimposed pulsations, λ_2-isosurface, Reynolds number

Введение

Помимо пассивных методов повышения эффективности перемешивания в микромиксерах за счет изменения геометрии устройства [3,4], на практике ис-

пользуют и активные методы, предусматривающие различные дополнительные внешние воздействия. Одним из таких методов является наложение пульсаций расхода на входные потоки. Пульсации расхода, как было отмечено авторами работы [5], меняют профиль скорости и структуру потока. В [6] проведено моделирование течения в Т-микроканале при малом числе Рейнольдса Re = 0,2, исследованы поля коэффициента перемешивания при различных амплитудах и частотах колебаний. Источник пульсаций может располагаться и внутри потока. Так, в [7] исследованы поля скоростей и концентраций течения в Т-микроканале с пульсирующим элементом, расположенным в месте слияния потоков. Динамика вязкой жидкости при низких числах Рейнольдса в микроканале с осциллирующим цилиндром исследована в [8]. Целью настоящей работы является исследование влияния вязкости рабочей жидкости на структуру течения в Т-микроканале с наложенными пульсациями во входных каналах в широком диапазоне чисел Рейнольдса и величин частот колебаний входящего потока.

Методы и материалы

Расчетные области, использованные в работе, были построены по аналогии с микроканальными установками Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Т-образный микроканал имел размеры 120×120×240 мкм. Рабочими жидкостями были вода и водный 30 % раствор глицерина. Рабочие жидкости поступали в канал через входные отверстия. Скорость потока задавалась на входе. Наложенные синфазные пульсации расхода были применены к основному потоку во входных каналах. Основной характеристикой потока выступало число Рейнольдса $\mathrm{Re} = U_0 D_h/\nu$, где U_0 – средняя скорость потока в выходном канале, $D_h = 160$ мкм – гидравлический диаметр указанного микроканального устройства.

Численное моделирование течения в Т-микроканале с наложенными пульсациями проводилось в CFD-пакете STAR CCM+. Для описания течения в канале микронного размера использовались нестационарные уравнения Навье-Стокса. В качестве рабочих жидкостей рассматривались вода и водный 30% раствор глицерина, их физические параметры полагались постоянными. В каждом конкретном расчете использовался только один вид жидкости. Использованные модели многофазного взаимодействия предполагали, что среда является взаимопроникающим континуумом с общим полем давления. Параметры расчета включали в себя: D_h – гидравлический диаметр устройства, для рассматриваемого канала величина составляла $D_h = 160$ мкм, Re – число Рейнольдса (в разных постановках задавались параметры из диапазона от 120 до 400), ρ – плотность конкретного вида рабочей жидкости, S – площадь сечения выходного канала ($S = 28800$ мкм^2), ν – кинематическая вязкость рабочей жидкости. Поток считался ламинарным.

Пульсации подавались на оба входных канала. Величина расхода жидкости во входных каналах Q_1 и Q_2 от времени изменялась по формуле:

$$Q_1 = Q_2 = Q_a \sin(\omega t) + Q,$$

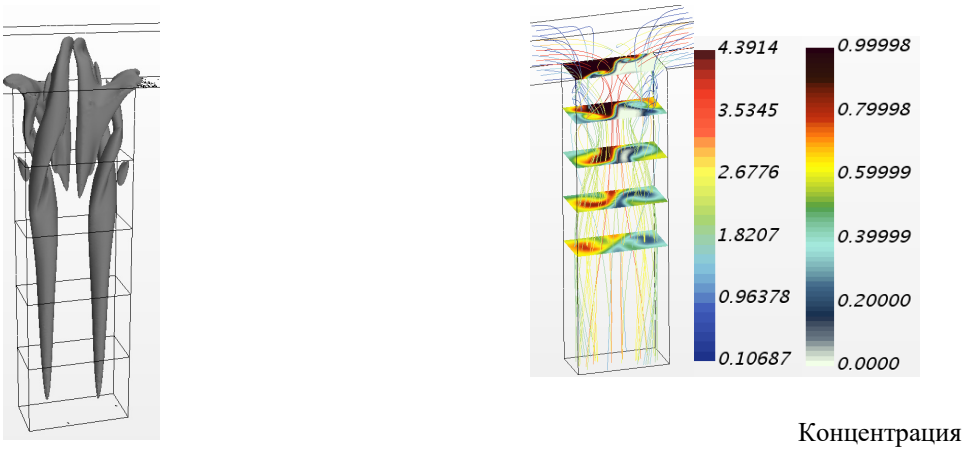
где

$$Q = \frac{\rho \mathrm{Re} \nu S}{D_h},\ Q_a = 1{,}57 \cdot 10^{-8}\ \text{кг/с}.$$

Избыточное давление на входе было равно 0, то есть жидкость свободно вытекала из канала. Расчетная область построена следующим образом: жидкость поступает в канал через два противонаправленных соосных канала с квадратными сечениями (длина грани 120 мкм), а покидает устройство через выходной канал с прямоугольным сечением 120 х 240 мкм^2. Входные каналы составляют угол 90° к выходному. Многогранные ячейки расчетной сетки были измельчены в области слияния потоков. Количество ячеек состаляло ~10^6.

Результаты

В качестве рабочей жидкости был выбран 30% водный раствор глицерина плотностью 1076,5 кг/м^3 и вязкостью 0,001432 Па·с. Частоты наложенных пульсаций менялись в диапазоне от 0 до 800 Гц.

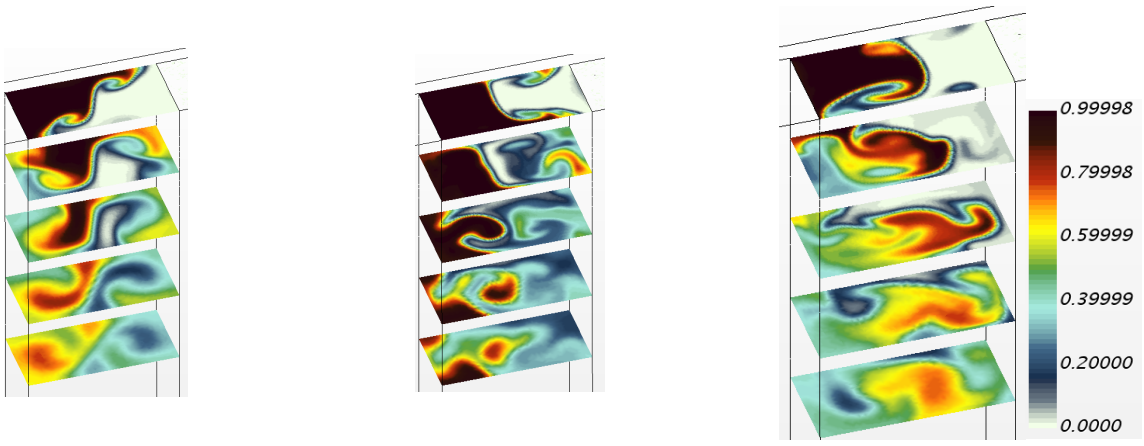


а) *б*)

Рис. 1. λ_2-изоповерхность (а) и линии тока с указанием скорости и поля концентраций в поперечных сечениях iD_h, i=0..4 (б) вязкой жидкости в Т-микроканале с наложенными пульсациями при Re = 120, f = 200..800 Гц

При Re = 120 течение является стационарным, и пульсации не влияют на поток, картина течения идентичная для всех исследованных частот наложенных пульсаций. Для повышения эффективности перемешивания в Т-микромиксере вязких жидкостей при низких числах Рейнольдса метод добавления наложенных пульсаций является неэффективным.

Для случаев больших чисел Рейнольдса, когда поток в канале становится нестационарным, частоты начинают вносить вклад в картину течения вязкой жидкости в Т-микроканале. Для лучшего понимания картины течения в канале были построены поля концентраций в поперечных сечениях выходного канала (рис. 2).



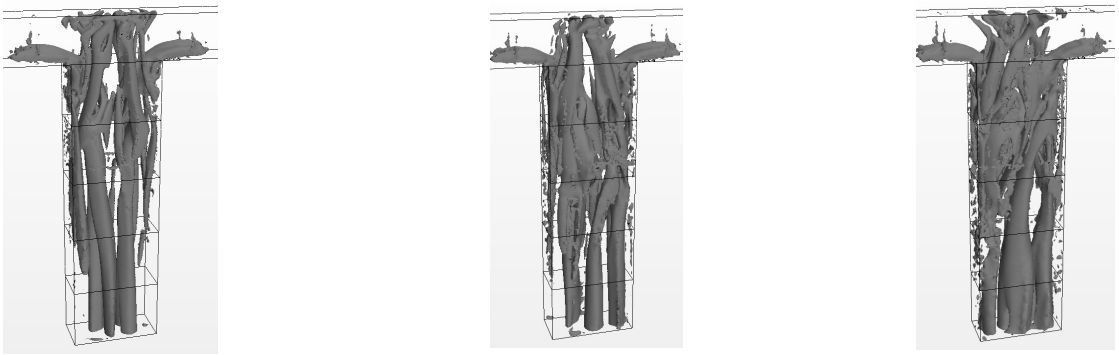
а) *б*) *в*)

Рис. 2. Поля концентрации в Т-микромиксере при Re = 400
и различных частотах возмущения входного потока.

При больших числах Рейнольдса (Re > 250) λ_2-изоповерхности имеют очень сложную структуру (рис. 3), а также являются нестационарными. В области слияния потоков λ_2-структуры совершают колебательные движения вдоль оси входных каналов, а в выходном канале наблюдается винтовое вращение «ножек» изоповерхности. Увеличение наложенной частоты приводит к укрупнению вихревых структур в выходном канале, что является косвенным признаком улучшения эффективности перемешивания.

Заключение

Исследовано влияние наложенных пульсаций на течение вязкой жидкости в Т-микроканале. При низких числах Рейнольдса пульсации не оказывают влияние на поток. При больших числах Рейнольдса увеличение частоты пульсации приводит к укрупнению размера «ножек» вихревой изоповерхности в выходном канале.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. λ_2-структуры в Т-микроканале при различных синфазных частотах, накладываемых на расходы во входных каналах: а) – f = 200 Гц, б) – f = 400 Гц, в) – f = 800 Гц

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li B., Hou J., Xu K., Gao Q., Zeng M., Wang Q. Optimal designs for flow uniformity at inlet of microchannel flat tube heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Volume 226, 2023, 120300, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120300.

2. Кашкарова М.В., Кравцова А.Ю., Павлов В.А. Диагностика течения в микроканалах с наложенными пульсациями // Сборник материалов Национальная конференция с международным участием, «СибОптика»; (Новосибирск,14 мая), 2024, Т.8, с.101–106. DOI 10.33764/2618-981X-2024-8-1-101-106.

3. Rasheed, K., Ansari, M.A., Alam, S. et al. Performance analysis of T-shaped micromixers using an innovative bend structure of mixing channel. Microfluid Nanofluid 29, 6 (2025). https://doi.org/10.1007/s10404-024-02783-3.

4. Houssein A., Bassem E.Z., Jalal F., Mahmoud K. Enhanced micromixer designs for chemical applications – Numerical simulations and analysis. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, Volume 208, 2025, 110098, ISSN 0255-2701, https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110098.

5. Karbaschi M, Javadi A, Bastani D, Miller R (2014) High frequency oscillatory flow in micro channels. Colloids Surf A460:355–360. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.03.062.

6. Cheaib F, Kekejian G, Antoun S, Cheikh M, Lakkis I (2016) Microfluidic mixing using pulsating flows. Microfluidics and Nanofluidics 20:70. https://doi.org/10.1007/s10404-016-1731-4/.

7. Seyed M.M., Ehsan A., Hossein S.R., Reza K. Numerical study of the performance of an active micromixer based on the oscillations of a microbeam. Chemical Engineering Science, Volume 297, 2024, 120273, ISSN 0009-2509, https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120273.

8. Ghanbari S. et al. Numerical investigating the impact of fluid properties and oscillation frequency on micro mixer efficiency. Heliyon, Volume 11, Issue 1, e41290, https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)17321-5.

© М. В. Кашкарова, А. Ю. Кравцова, 2025

УДК 681.7, 535.8
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-138-145

В. В. Рахманов[1]✉, С. К. Качурин[2], В. Г. Мелединн[1], Г. В. Бакакин[1]

Исследование температурной зависимости коэффициента усиления микропиксельных лавинных фотоприемников

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rahmanov@inbox.ru

Аннотация. В работе исследована температурная зависимость коэффициента усиления кремниевого микропиксельного фотоэлектронного умножителя СРТА 150–30 для трех длин волн регистрируемого излучения: 565 нм, 700 нм и 940 нм. Определена методика и создан экспериментальный стенд для тестирования кремниевых фотоприемников в диапазоне температур от 20 до 75 °С. Результаты измерений температурной зависимости коэффициента усиления показали спад коэффициента усиления кремниевого фотоэлектронного умножителя при нагреве от +20 до +60 °С в 10 раз. Полученные численные зависимости коэффициента усиления фотоприемника для трех длин волн светового потока могут быть использованы для построения схемы компенсации коэффициента усиления от температуры для данного типа фотоумножителей.

Ключевые слова: температурная зависимость, коэффициент усиления, кремниевый микропиксельный фотоэлектронный умножитель

V. V. Rakhmanov[1]✉, S. K. Kachurin[2], V. G. Meledin[1], G. V. Bakakin[1]

Investigation of the temperature dependence of the gain coefficient of mcropixel avalanche photodetectors

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia Federation
e-mail: rahmanov@inbox.ru

Abstract. The paper studies the temperature dependence of the gain of the silicon micropixel photomultiplier tube CPTA 150–30 for the following wavelengths of registered radiation: 565 nm, 700 nm and 940 nm. A technique is defined and an experimental setup is created for testing silicon photodetectors in the temperature range from 20 to 75 °C. The results of measuring the temperature dependence of the gain showed a 10-fold decrease in the gain of the silicon photomultiplier when heated from +20 to +60 °C. The obtained numerical dependences of the gain of the photodetector for three wavelengths of the light flux can be used to build a gain compensation circuit for the temperature of this type of photomultiplier.

Keywords: temperature dependence, gain, silicon micropixel photomultiplier

Введение

Задача регистрации световых сигналов актуальна в очень широком круге областей современной науки: детектирования частиц в ядерной физике, спектральный анализ, фотометрия, метеорологические лидары и др. [1-2].

Существует различные виды приемников светового излучения, каждый из которых, применяется для решения определенных задач.

Развитие технологии изготовления лавинных фотодиодов привело к появлению нового вида фотоприемников, такого как кремниевый микропиксельный фотоумножитель (Si-PM) [3]. Si-PM обладает высоким коэффициентом усиления (~10^6) и существенным быстродействием (время нарастания сигнала составляет 200 – 300 пс). Еще одним преимуществом данного типа фотоэлектронного усилителя (ФЭУ) является низкое, по сравнению с классическим вакуумным ФЭУ, напряжение питания (25 – 60 В). Внешний вид кристалла и структура Si-PM приведена на рис. 1.

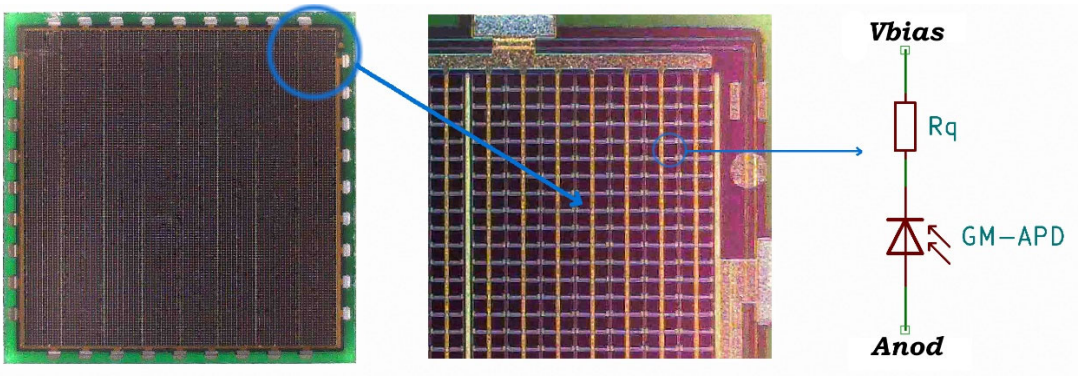


Рис. 1. Внешний вид и упрощенное внутреннее устройство Si-PM

Si-PM является матричной структурой, состоящей из отдельных ячеек (лавинный фотодиод GM-APD и гасящий резистор R_q), число которых варьируется в пределах от 10^3 до 10^5.

Принцип работы схож с работой лавинного фотодиода, но ток через каждую ячейку ограничен за счет гасящего резистора. Ток каждой ячейки суммируется, и в результате достигается коэффициент усиления 10^5 – 10^6, в зависимости от количества задействованных ячеек. Таким образом коэффициент усиления Si-PM сопоставим с классическими ФЭУ, но при этом габаритные размеры таких устройств значительно меньше, и сторона квадрата составляет несколько миллиметров.

Данный вид ФЭУ все более широко внедряется в современную экспериментальную технику. На текущий момент Si-PM массово используется в научных и бытовых приборах, таких как: детекторы излучения в ядерной физике, астрономии, спектрометрических приборах, измерителях расстояния, датчиках парковки и др. [4-6]

Одним из применений данного типа фотоприемника является использование его в лазерных доплеровских анемометрах (ЛДА) для измерений скорости аэро- и гидродинамических течений. В основном, такие приборы используют классические ФЭУ как приемники оптического излучения. Но в последнее время ведутся работы по внедрению Si-PM в качестве фотоприемника в ЛДА [7-8].

Однако, в отличие от вакуумных ФЭУ, коэффициент умножения кремниевых фотоумножителей существенно изменяется от температуры [9-10], и для таких задач как спектрометрические измерения, лидары и др. необходимо знать температурную зависимость коэффициента усиления для возможности ее компенсации аппаратными или программными способами.

Целью данной работы является создание методики и измерение зависимости коэффициента усиления кремниевого микропиксельного фотоумножителя от температуры в диапазоне от 24 до 75°С.

Методика измерений и экспериментальной стенд

Для измерения зависимости коэффициента усиления Si-PM от температуры необходимо одновременное измерение локальной температуры и уровня выходного сигнала фотоприемника при неизменном уровне освещенности. Кроме того, так как квантовая эффективность преобразования Si-PM зависит от длины волны регистрируемого излучения, то необходимо обеспечить освещение на нескольких длинах волн. В данной работе предлагается использовать источники света трех длин волн, от зеленого до инфракрасного, как наиболее часто используемые в лазерных доплеровских анемометрах.

Общая схема измерительного стенда приведена на рис. 2.

На Si-PM поступает модулированное при помощи генератора импульсного тока Г оптическое излучение от светодиода СД и одновременно осуществляется локальный нагрев фотоприемника при помощи нагревателя Rн. Для работы фотоприемника в режиме фотоумножителя с источника Исм на него подается напряжение смещения.

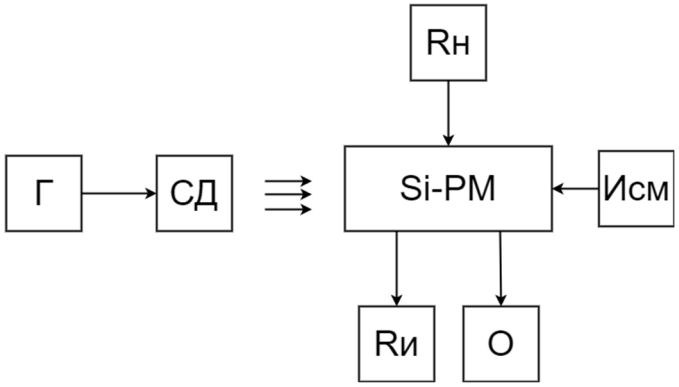


Рис. 2. Схема измерительного стенда: Г – генератор импульсного тока для светодиода; СД – светодиод; Исм – источник напряжения смещения Si-PM; О – измерительный осциллограф; Rи – терморезистор и омметр; Rн – резистор-нагреватель

При помощи заранее откалиброванного терморезистора Rи, расположенного вплотную к фотоприемнику, и измерителя сопротивления производится измерение текущей температуры Si-PM. Одновременно осуществляется фиксация выходного сигнала с фотоприемника при помощи осциллографа О.

Таким образом, зафиксировав уровень выходного сигнала фотоприемника при комнатной температуре (25,5 °С) при неизменном уровне сигнала генератора и напряжения источника смещения, и регулируя температуру, измеряется зависимость относительного коэффициента усиления Si-PM от температуры.

В качестве источника световых сигналов использовались три светодиода: инфракрасный SFH4545 (940 нм) infr, красный GNL-3014HT (700 нм) red и зеленый GNL-3014GD (565 нм) green. Коммутация между фотодиодами осуществлялась в ручном режиме при помощи тумблеров. Частота генератора выбрана равной 1 кГц ± 10 %. Такая частота генератора позволяет получать неискаженный меандр в световом потоке со светодиодов.

Приемная часть измерительного стенда состоит из фотоприемника и усилителя фототока в виде трансимпедансного усилителя на основе микросхемы с резистором обратной связи 1 МОм.

В качестве фотоприемника использовался кремниевый микропиксельный фотоэлектронный умножитель СРТА 151–30 с количеством ячеек 796 и коэффициентом усиления ~10^6. Напряжение смещения для этого фотоумножителя может быть от 25 до 34 В. Для данной работы оно выбрано равным 28,7 В, так как это напряжение позволяет схеме фотоприемника работать в линейном режиме во всем диапазоне температур.

Измерение выходного сигнала фотоприемника осуществлялось посредством осциллографа Tektronix TDS 2014. Измерялось среднеквадратичное значение выходного напряжения с формой сигнала меандр.

Кривая квантовой эффективности в зависимости от длины волны оптического излучения для данного фотоприемника приведена на рис. 3.

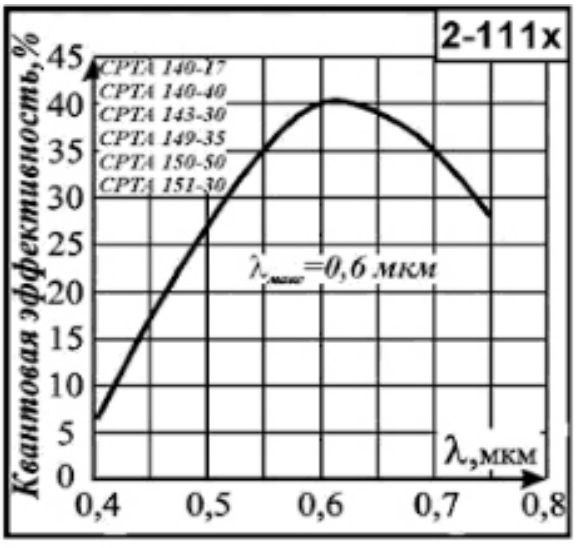


Рис. 3. Квантовая эффективность Si-PM СРТА 150–30 [11]

Максимальная эффективность работы фотоприемника достигается на длине волны оптического излучения 620 нм.

Для нагрева элемента Si-PM использовался резистор с номиналом 10 Ом мощностью 1 Вт, размещенный вплотную к фотоприемнику. Для его нагрева, через него пропускался ток от внешнего регулируемого источника питания.

Для измерения температуры фотоприемника использовался термистор, размещенный также вплотную к фотоприемнику. В данной работе использовался миниатюрный термистор BS7861-S.

Была выполнена калибровка показаний термистора в диапазоне от 0 до 97 °C (рис. 4). Измерения проводились в емкости с водой с постепенным повышением температуры от нуля (тающий лед) до максимальной. В процессе измерения слои воды постоянно перемешивались при помощи потока пузырей воздуха от компрессора (барботаж) для меньшего температурного градиента в измеряемом объеме.

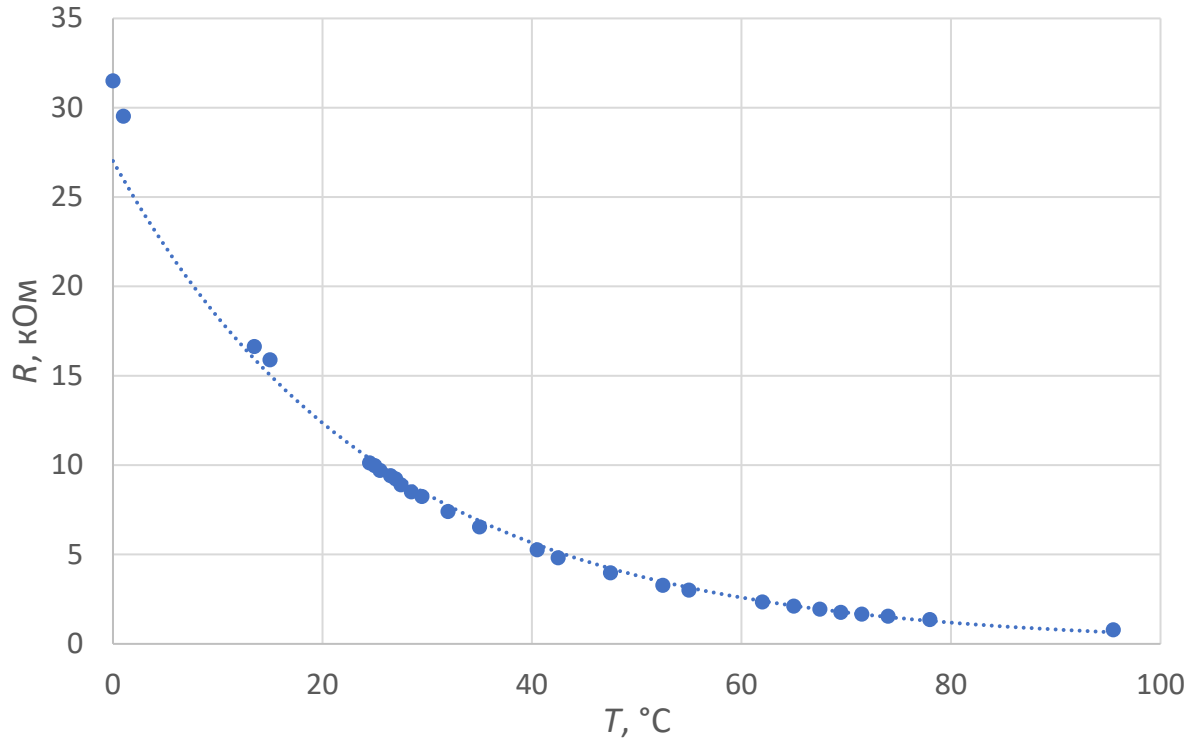


Рис. 3. Зависимость сопротивления R термистора BS7861-S от температуры T.

Результирующая калибровочная характеристика описывается следующей формулой:

$$T = -25,46 \cdot \ln(R) + 84,12,$$

где T – температура в градусах Цельсия; R – сопротивление термистора в кОм.

Диапазон измерений температурной зависимости коэффициента усиления Si-PM был от 24 до 75 °C, что является рабочим диапазоном для данного Si-PM.

При каждом значении температуры производилось три измерения для различных светодиодов (зеленый, красный, инфракрасный). Частота в 1 кГц оставалась неизменной на протяжении всего эксперимента, как и напряжение смещения фотоприемника 28,7 В.

Результаты

В результате измерений были получены экспериментальные данные по зависимости коэффициента усиления кремниевого микропиксельного фотоумножителя от температуры для трех длин волн оптического излучения. Относительный коэффициент усиления *K* получен как отношение значения амплитуды сигнала с выхода фотодетектора к амплитуде сигнала при 25,5 °С. На графике (рис. 4) приведена полученная зависимость относительного коэффициента усиления от температуры в процентах.

Все измерения проведены на частоте генератора 1 кГц при напряжении обратного смещения фотодетектора 28,7 В.

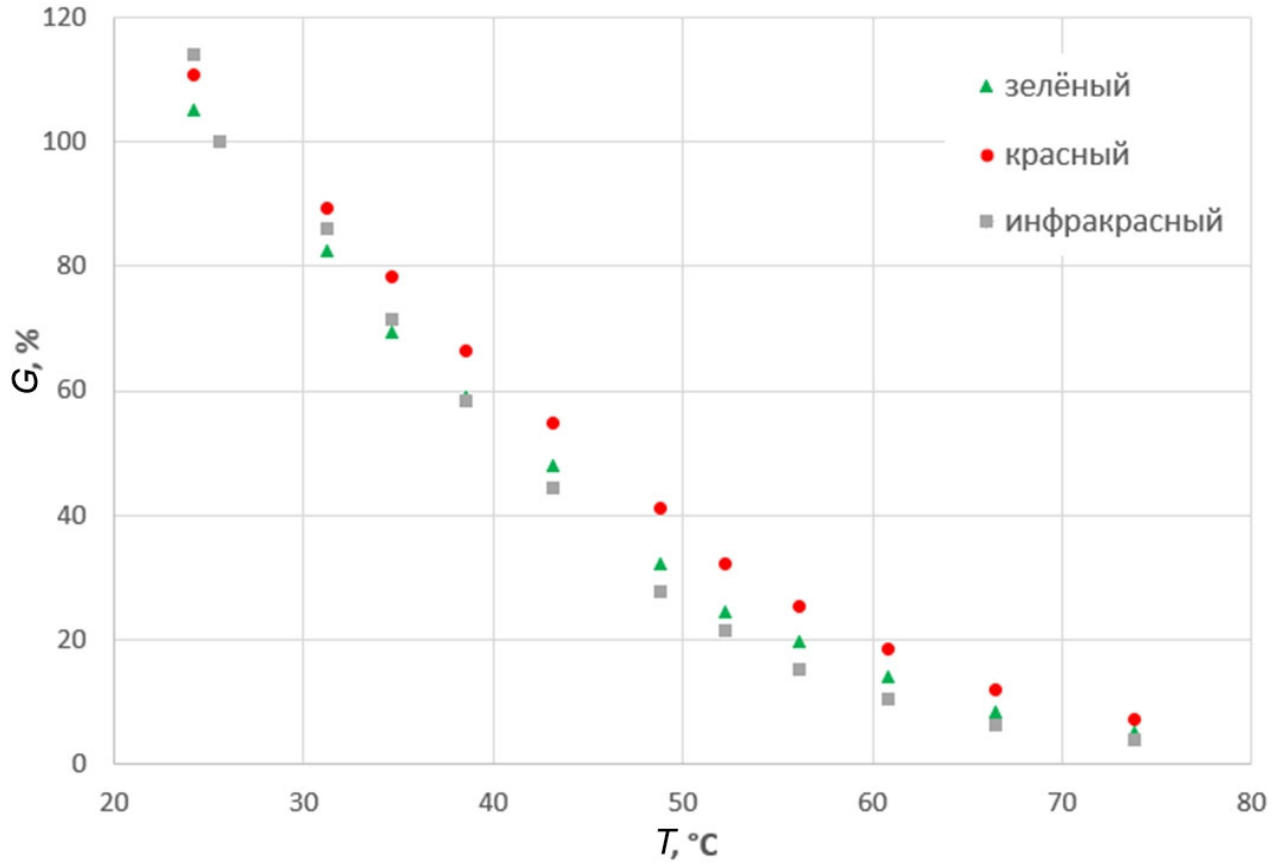


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента усиления *G* от температуры *T* при разных длинах волн осветителя

Из полученных данных видно, что при повышении температуры коэффициент усиления на измеренных длинах волн снижается. Кривая зависимости может

быть аппроксимирована полиномом 2-й степени с высокой степенью достоверности R^2=0,995.

Как видно из полученных данных, разница в изменении коэффициента усиления для разных длин волн не превышает 10% во всем диапазоне температур. При этом, для длин волн с максимальной квантовой эффективностью (красный свет) спад коэффициента усиления происходит более плавно.

Из графика видно, что при температуре 65 °С происходит 10-кратный спад коэффициента усиления. Поэтому в реальных условиях работы необходимо обеспечивать термокомпенсацию коэффициента усиления для данного вида фотоприемников.

Заключение

Была разработана методика и создан лабораторный стенд для исследования температурной зависимости коэффициента усиления микропиксельных лавинных фотоприемников.

Выполнена калибровка значений сопротивления термистора B57861-S от температуры в диапазоне от 0 до 97°С.

Выполнено исследование зависимости коэффициента усиления кремниевого фотоумножителя СРТА 151–30 от температуры. Результаты измерений показали значительное (более чем в 10 раз) уменьшение коэффициента усиления Si-PM с нагревом в диапазоне температур от +20 до +75°С.

Получены численные зависимости коэффициента усиления Si-PM для трех длин волн светового потока (940, 700 и 565 нм).

Результаты данной работы позволять создать схему компенсации коэффициента усиления для данного типа Si-PM или учитывать изменения коэффициента усиления от температуры программными методами в результате последующей обработки данных.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приемники оптического излучения / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов; под ред. В. В. Коротаева. – Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2014. – 303 с.

2. Оптическая и квантовая электроника: учебник для ВУЗов / А. Н. Пихтин – М.: Высшая школа, 2001.

3. Dinu, N. (2016). Silicon photomultipliers (SiPM). https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-445-1.00008-7.

4. Buzhan P., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 504 (2003), pp. 48–52.

5. Riu J, Sicard M, Royo S, Comero´ n A. Silicon photomulti-plier detector for atmospheric lidar applications. Optics Let-ters 2012;37(7):1229–31.

6. Imando, A.T., Dinu, N., Callier, S., Cuisy, D., Gaspard, M., Pinot, L., et al., 2012. Miniaturized multi-channels SiPM read-out electronics for medical imaging application. In: Proceedings of Sci-ence, PoS (PhotoDet2012)049.

7. Рахманов В. В., Кашкарова М. В., Какаулин С. В., Зубанов К. С., Двойнишников С. В. Анализ границ применимости фотоэлектронных умножителей в составе лазерного доплеров-

ского анемометра. Измерительная техника, 73(6), 32–39 (2024). https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-32-39.

8. V V Rakhmanov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012088.

9. Zi, Cg., Chang, Jf., Yang, Mj. et al. A compensation circuit for the gain temperature drift of silicon photomultiplier tube. Radiat Detect Technol Methods 7, 571–577 (2023). https://doi.org/10.1007/s41605-023-00422-z.

10. Wolfgang Schmailzl et al 2022 JINST 17 P12009. https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/12/P12009.

11. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с., табл. 415, ил. 1326.

© В. В. Рахманов, С. К. Качурин, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, 2025

УДК 681.7, 535.8
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-146-152

В. В. Рахманов[1]✉, В. Г. Мелединн[1], Г. В. Бакакин[1], В. Г. Главный[1]

Методика тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rahmanov@inbox.ru

Аннотация. В статье представлена методика тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей, адаптированная к условиям применения в лазерных доплеровских анемометрах. Точность измерений лазерных доплеровских анемометров напрямую зависит от способности фотоприемника корректно передавать высокочастотные сигналы без искажений. Существующие методики тестирования не всегда учитывают специфику работы фотоприемников в условиях слабых сигналов и широкого динамического диапазона, характерных для лазерных доплеровских анемометров. Предложенный метод основан на применении белого шума, генерируемого источником теплового излучения, в качестве тестового сигнала. Это позволило избежать использования дорогостоящих импульсных лазеров или сложных модуляторов света. В работе были получены зависимости выходного напряжения от частоты при различных уровнях питающего напряжения.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, амплитудно-частотная характеристика, дробовой шум

V. V. Rakhmanov[1]✉, V. G. Meledin[1], G. V. Bakakin[1], V. G. Glavny[1]

Method for testing the amplitude-frequency characteristics of photomultiplier tubes

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: rahmanov@inbox.ru

Abstract. The article presents a technique for testing the amplitude-frequency characteristics of photomultipliers adapted to the conditions of use in laser Doppler anemometers. The accuracy of laser Doppler anemometer measurements directly depends on the ability of the photodetector to correctly transmit high-frequency signals without distortion. Existing testing techniques do not always take into account the specifics of photodetector operation under conditions of weak signals and a wide dynamic range typical of laser Doppler anemometers. The proposed method is based on the use of white noise generated by a thermal radiation source as a test signal. This made it possible to avoid the use of expensive pulsed lasers or complex light modulators. In the work, the dependences of the output voltage on the frequency at different levels of the supply voltage were obtained.

Keywords: photomultiplier tube, amplitude-frequency characteristic, shot noise

Введение

Лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) являются ключевыми инструментами в аэродинамике, гидродинамике, промышленной автоматизации и биомедицинских исследованиях, обеспечивая бесконтактное измерение скорости объектов с высокой точностью. Однако их эффективность напрямую зависит от

характеристик фотоприемных устройств, таких как фотоэлектронные умножители (ФЭУ), которые преобразуют оптические сигналы, модулированные доплеровским сдвигом, в электрические. Одним из критических параметров фотоприемника на основе ФЭУ является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), определяющая диапазон частот, в котором устройство способно корректно передавать сигнал без искажений.

Ограничения полосы пропускания ФЭУ могут приводить к потере информации о высокочастотных компонентах доплеровского сигнала, что снижает точность измерений, особенно в условиях высокоскоростных потоков или малых уровней освещенности [1-2].

При подготовке к различным физическим экспериментам зачастую необходимо выполнять исследования характеристик применяемых ФЭУ на соответствие заданным параметрам: коэффициент усиления, рабочее напряжение при заданном усилении, темновой ток при максимально допустимом напряжении, максимальная квантовая эффективность, временные характеристики и др. [3-5].

Современные методики тестирования ФЭУ часто не учитывают специфические требования ЛДА, такие как необходимость работы в условиях слабых сигналов, широкого динамического диапазона и высоких частот доплеровского сдвига (до сотен МГц).

Для тестирования АЧХ фотоприемника используют различные методы модуляции излучения передающего сигнала: вертикально-излучающие лазеры, акустооптические ячейки Брэгга, электрооптические ячейки Керра, методы пикосекундных оптических импульсов, интерференции двух лазеров с близкими длинами волн, интерферометрическая демодуляция частотно моделированного сигнала полупроводникового лазера и др. [6-7].

Но эти методы сложны в реализации, требуют дорогостоящего оборудования и, зачастую, избыточны в случае, когда необходимо оценить рабочий диапазон частот фотоприемника.

Разработка усовершенствованной методики тестирования АЧХ ФЭУ, адаптированной к условиям ЛДА, позволит:

– повысить точность измерений за счет учета нелинейных искажений и шумовых характеристик;

– оптимизировать выбор ФЭУ для конкретных применений, сокращая затраты на разработку;

– расширить функциональные возможности ЛДА в высокочастотных режимах с низкой интенсивностью светового потока.

Актуальность исследования усиливается растущими требованиями к точности в высокоскоростных аэродинамических приложениях, где важен широкий динамический диапазон измеряемых скоростей.

Целью данной работы является создание методики тестирования АЧХ фотоприемников в условиях работы, приближенных к реальным в составе ЛДА.

Методика тестирования

На быстродействие ФЭУ как конечного изделия (фотоприемника) влияют несколько параметров: конструкция вакуумной колбы, реализация делителя

напряжения, быстродействие усилителя, флуктуации и уровень напряжения питания и др. [8]. На рис. 1 представлены основные части фотоприемника на основе ФЭУ, влияющие на его быстродействие.

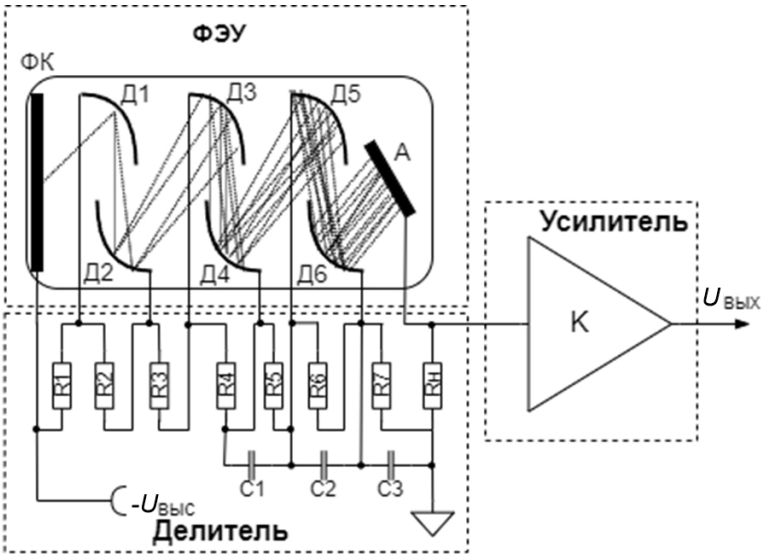


Рис. 1. Схематичное изображение составных частей фотоприемника на основе ФЭУ

ФЭУ, упрощенно, состоит из фотокатода ФК, набора динодов Д1-Д6 и анода А. Для получения электронной лавины между всеми выводами ФЭУ создается электрическое поле при помощи делителя напряжения и приложенного к ФК напряжения $-U_{выс}$.

Один из самых простых методов оценки быстродействия фотоприемника состоит в измерении времени нарастания фронта выходного сигнала после усилителя (рис. 2).

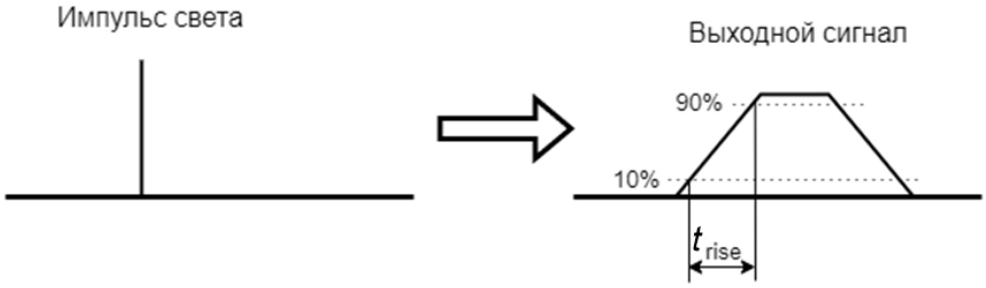


Рис. 2. Измерение времени нарастания t_{rise} от короткого импульса света

На практике пересчет полосы времени нарастания в полосу пропускания выполняют по формуле:

$$F = 350 / t_{rise}, \quad (1)$$

где F – частота в МГц; t_{rise} – время в нс.

Так, для заданной полосы пропускания в 100 МГц измеренное время нарастания сигнала с выхода усилителя должно быть не более 3,5 нс.

Типичные времена нарастания для различных типов ФЭУ составляют от 0,1 до 20 нс и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Типичные времена нарастания для различных типов ФЭУ [8]

Тип динодной структуры	Время нарастания, нс
С круговой клеткой	0,9 – 3,0
Коробочно-сеточный	6 – 20
Линейно-ориентированный	0,7 – 3
Жалюзиобразный	6 – 18
Сетчатый	1,5 – 5,5
Микроканальный	0,1 – 0,3

Необходимо отметить, что на время нарастания сигнала и, как следствие, полосу пропускания ФЭУ влияет напряжение питания: чем выше напряжение питания, тем выше напряженность электрического поля, и меньше времени необходимо лавине электронов для преодоления расстояния то фотокатода до анода. Поэтому времена нарастания для конкретных типов ФЭУ приводят при определенном напряжении питания.

Применение такого подхода к измерению АЧХ фотоприемников на основе ФЭУ требует наличие импульсных калиброванных источников света, что не всегда возможно. Кроме того, данный метод не позволяет получить детальную картину АЧХ, а только оценить полосу пропускания.

Предлагаемый нами метод основан на использовании белого шума в качестве тестового сигнала для проведения измерений частотной характеристики фотоприемника [9].

Белый шум – это случайный сигнал, математически аналогичный импульсной δ-функции во времени и плоскому спектру в частотном представлении. Белый шум может использоваться в качестве альтернативного тестового сигнала для оценки частотной характеристики фотоприемников.

Для реализации методики в качестве источника белого шума, обеспечивающего тестирование всего тракта фотоприемника, используется статистически осредненный источник теплового излучения видимого диапазона, который вызывает электронную лавину на фотоприемнике. В результате шумовой сигнал с равномерной спектральной плотностью $S(f)$ проходит через систему с частотной характеристикой $H(f)$, то спектр выходного сигнала будет:

$$S_{\text{вых}}(f) = |H(f)|^2 \cdot S(f), \quad (1)$$

Зная $S(f)$ и измерив $S_{\text{вых}}(f)$, можно восстановить $|H(f)|$:

$$\left|H\left(f\right)\right| = \sqrt{S_{\text{вых}}\left(f\right) / S\left(f\right)} \ . \qquad (2)$$

При уровне собственных шумов ФЭУ (темновой шум) значительно меньшем уровня сигнала от тестового некогерентного источника излучения им можно пренебречь.

Таким образом, для получения АЧХ фотоприемника на основе ФЭУ необходим источник теплового излучения, исследуемый фотоприемник с источником питания и спектроанализатор.

В тестовом стенде (рис. 3) использовались счетно-фотонные ФЭУ производства Hamamatsu R6358-10 с усилителем собственной разработки и источником питания на 1,25 кВ и анализатор спектра АКИП 4205/3 с частотным диапазоном от 9 кГц-1,5 ГГц. Производитель заявляет, что время нарастания фронта для данного ФЭУ составляет 1,4 нс, что соответствует граничной частоте 250 МГц. Однако применяемый делитель напряжения и усилитель могут существенно ограничивать данную полосу частот.

Интенсивность излучения, падающего на ФЭУ, регулируется размером диафрагмы на входе фотоприемника и интенсивностью источника теплового излучения.

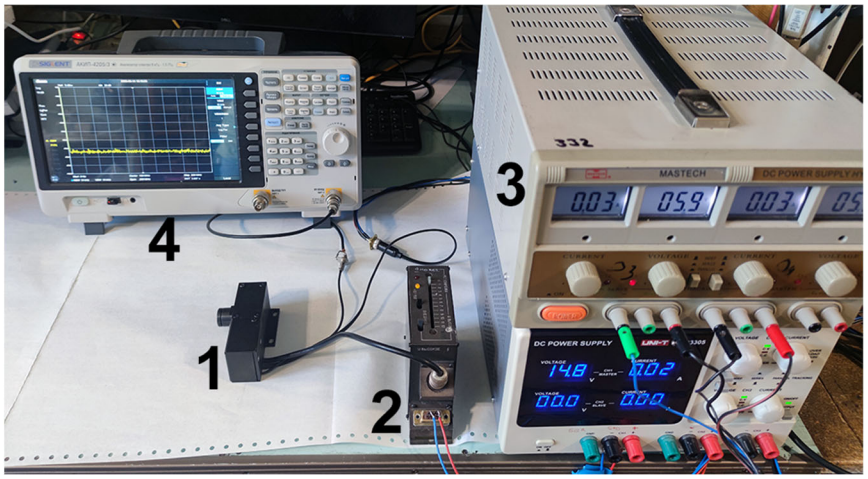


Рис. 3. Фотография тестового стенда: 1 – фотоприемник; 2 – источник высокого напряжения; 3 – источник питания усилителя; 4 – спектроанализатор

Результаты

В результате применения разработанной методики тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей получены графики зависимости значений выходного напряжения от частоты (рис. 4) при разном напряжении высоковольтного питания.

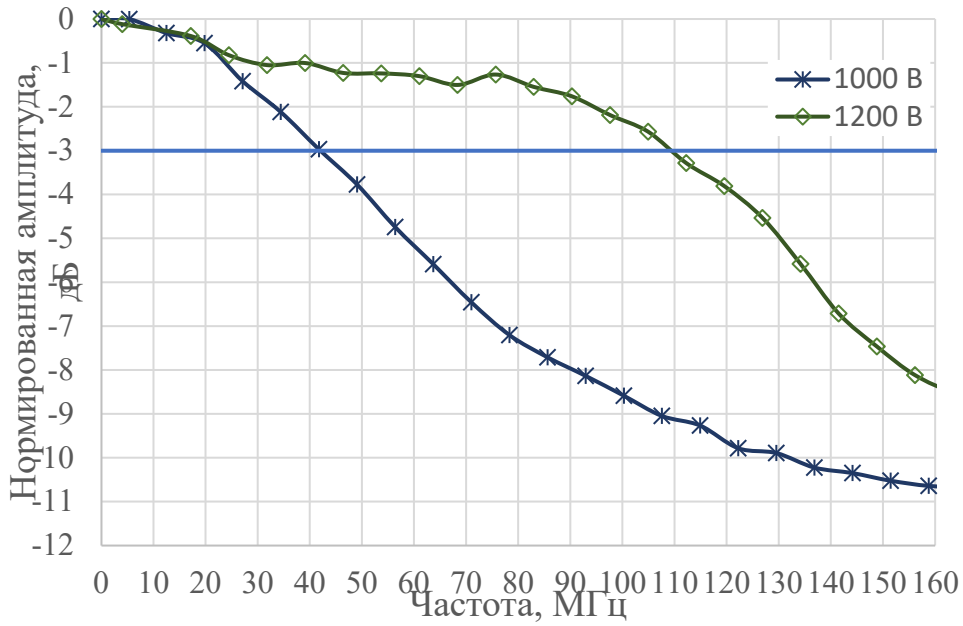


Рис. 4. АЧХ фотоприемника *H*(*f*) при разных напряжениях питания

Из приведенного графика видно, что при напряжении на ФЭУ, равном 1000 В, полоса пропускания фотоприемника по уровню –3дБ (42 МГц) ограничена исключительно самим модулем ФЭУ, и другие элементы не играют существенной роли. При подаче почти максимального для данного вида ФЭУ напряжения полоса пропускания расширяется до 110 МГц. В данном случае уже начинают сказываться ограничения, накладываемые усилителем сигнала и применяемым делителем напряжения.

Кроме того, данный метод позволяет наглядно оценить равномерность полосы пропускания в рабочей области. При применении данного фотоприемника в составе ЛДА, рабочей областью частот является диапазон от 60 до 100 МГц с центром на 80 МГц. При коэффициенте преобразования доплеровской частоты в скорость в районе 120 кГц/(м/с) (типичный коэффициент преобразования для ЛДА серии ЛАД-05*) это соответствует диапазону скоростей от –160 до +160 м/с.

Из данного графика видно, что при напряжении 1000 В полезный сигнал будет ослабляться, в среднем, в 2,3 раза. Причем, ослабление будет неравномерным и будет завесить от направления измеряемой скорости потока. При этом неравномерность АЧХ в рабочей области частот составляет 3,4 дБ. В случае использования напряжения 1200 В неравномерность в рабочей области будет всего 1 дБ, и ослабление сигнала не превысит 1,3 раза.

Заключение

Разработана методика тестирования АЧХ ФЭУ, основанная на применении белого шума, генерируемого источником теплового излучения, адаптированная к специфике работы лазерных доплеровских анемометров.

Создан тестовый стенд, и получены экспериментальные данные зависимости значений выходного напряжения от частоты $H(f)$ при разном напряжении высоковольтного питания.

Данная методика позволит оптимизировать выбор ФЭУ для конкретных применений и повысить точность измерений за счет учета искажений АЧХ в рабочей области.

В дальнейшем планируется провести сравнение данного метода с методом оценки полосы пропускания при помощи импульсного лазера.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rakhmanov, V.V., Kabardin, I.K., Klimov, A.V. et al. Correcting Spectral Density of Laser Doppler Anemometer Signals during Measuring of High-Speed Aerodynamic Flows. Part 1. J. Engin. Thermophys. 34, 12–24 (2025). https://doi.org/10.1134/S1810232825010023.

2. Kabardin, I.K., Rakhmanov, V.V., Klimov, A.V. et al. Correcting Spectral Density of Laser Doppler Anemometer Signals during Measuring of High-Speed Aerodynamic Flows. Part 2. J. Engin. Thermophys. 34, 25–34 (2025). https://doi.org/10.1134/S1810232825010035.

3. Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 7(239). С. 643–661.

4. Yijiang Peng et al 2024 JINST 19 T08006 DOI 10.1088/1748-0221/19/08/T08006.

5. Research on time response of photomultiplier tubes / J. Xia, S. Qian, Z. Ning [et al.] // Proceedings of Science: 23, Vienna, 22–29 июля 2015 года. – Vienna, 2015. – P. 241. – EDN XUQPWN.

6. E. Eichen, J. Schlafer, W. Rideout and J. McCabe, "Wide-bandwidth receiver photodetector frequency response measurements using amplified spontaneous emission from a semiconductor optical amplifier," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 912-916, June 1990, doi: 10.1109/50.54509.

7. Mengke Wang, Shangjian Zhang, Ying Xu, Yutong He, Yali Zhang, Zhiyao Zhang, and Yong Liu, "Frequency response measurement of high-speed photodiodes based on a photonic sampling of an envelope-modulated microwave subcarrier," Opt. Express 29, 9836-9845 (2021).

8. Hamamatsu Photonics K. K. (2017). PHOTOMULTIPLIER TUBES Basics and Applications, 4-th edition. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4E.pdf (Дата обращения 22 апреля 2025 г.).

9. Saravanakumar Arumugam Investigations on using white noise as a test signal for performing frequency response measurements on transformers // Electric Power Systems Research, Vol. 202, 2022, 107586, ISSN 0378-7796, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107586.

© В. В. Рахманов, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, В. Г. Главный, 2025

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-153-160

В. О. Зуев[1]✉, С. В. Двойнишников[1], В. Г. Меледин[1], В. А. Павлов[1]

Метод фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке метода прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов со светорассеивающими свойствами в широком диапазоне на основе фазовой триангуляции. Предложен метод снижения погрешности расшифровки фазового распределения с учетом нелинейности и немонотонности приемно-передаточной функции в условиях ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения. Предложенный метод основан на восстановлении и поиске рабочего участка приемно-передаточной функции, построении обратного преобразования и его применения для зарегистрированных яркостей при работе метода фазовых шагов. Выполнено экспериментальное исследование эффективности разработанного метода расшифровки фазового распределения с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта. Среднеквадратичное отклонение восстановленного фазового распределения от истинного без учета нелинейности приемно-передаточной функции составило ~ 0,87 рад, а с ее адаптивной корректировкой ~ 0,02 рад. Можно сделать вывод, что применение предложенного метода контроля трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции позволит на порядок снизить погрешность трехмерных измерений.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, корректировка приемно-передаточной функции

V. O. Zuev[1]✉, S. V. Dvoynishnikov[1], V. G. Meledin[1], V. A. Pavlov[1]

Phase triangulation method with receiving-transmitting function adaptive correction

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the development of a phase triangulation method for three-dimensional geometry precision control of objects with light scattering properties in a wide range. A method, taking into account nonlinearity and non-monotonicity of the receiving-transmitting function in conditions of optical source and receiver limited dynamic range, is proposed. The proposed method is based on the reconstruction and search of the receiving-transmitting function work area, the construction of the inverse transformation and its application to the recorded brightness during the phase steps method operation. An experimental study of the effectiveness of the developed phase distribution decoding method with adaptive correction of the receiving-transmitting function has been performed. The standard deviation of the reconstructed phase distribution from the true one without taking into account the nonlinearity of the receiving-transmitting function was ~ 0.87 rad, and with its adaptive correction ~ 0.02 rad. It can be concluded that the proposed three-dimensional geometry control method based on phase triangulation will reduce three-dimensional measurements error by an order of magnitude.

Keywords: phase triangulation, receiving-transmitting function correction

Введение

Актуальность разработки и развития оптико-электронных систем измерения трехмерной геометрии обусловлена необходимостью высокоточного контроля геометрических параметров сложнопрофильных объектов в задачах науки и промышленности. Для достижения требуемого уровня погрешности контроля трехмерной геометрии, обеспечения надежной работы оптико-электронной измерительной системы и расширения диапазона контролируемых объектов требуется учет влияния на промежуточные измерительные данные внешнего нестационарного освещения и светорассеивающих свойств контролируемой поверхности.

Современные оптико-электронные системы измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции обеспечивают бесконтактный, неразрушающий контроль геометрических параметров с погрешностью на уровне 10^{-5} м [1], устойчивость к расфокусировке формирующей и регистрирующей оптических подсистем [2], параллельный контроль десятков тысяч точек поверхности [3] и возможность проведения скоростных измерений с помощью оптимизации количества и внутреннего устройства структурированных изображений [4].

Для прецизионного контроля трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции требуется минимизация погрешности расшифровки начальной фазы модулирующей синусоиды φ на основе набора значений яркости I^{in}, зарегистрированных фотоприемником в ходе линейных сдвигов $\Delta\varphi_i$ фазовой функции и итеративного формирования структурированных изображений с распределением яркости:

$$I_i^{out} = a_0 + a_1 \cdot \sin\left(\varphi + \Delta\varphi_i\right). \qquad (1)$$

Зачастую, при восстановлении фазового распределения предполагается линейность приемно-передаточной функции измерительного тракта и пропорциональность I^{in} и I^{out}, что сводит задачу поиска φ к решению системы трансцендентных уравнений [5]. Однако, отсутствие учета нелинейности приемной функции фотоприемника и передаточной функции источника приводит к возникновению систематической погрешности трехмерных измерений. Применение известных подходов расшифровки фазового распределения на основе восстановления обратной приемно-передаточной функции измерительного тракта [6] или предположение о ее соответствии степенному закону [7] требует строгой монотонности зависимости регистрируемой интенсивности от формируемой, что, зачастую, не реализуется из-за влияния светорассеивающих свойств контролируемой поверхности и ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения. В результате проблема расшифровки фазовых изображений с адаптивной к светорассеивающим свойствам поверхности корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта, компенсацией ее нелинейности и немонотонности остается актуальной.

Данная работа посвящена разработке метода измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции.

Метод адаптивной корректировки приемно-передаточной функции

Для минимизации погрешности восстановления фазового распределения в условиях ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения разработан метод адаптивной к светорассеивающим свойствам поверхности корректировки приемно-передаточной функции измерительного тракта. Основная идея предложенного метода заключается в восстановлении приемно-передаточной функции K и поиске рабочего диапазона $\left[I_S^{in}, I_E^{in} \right]$, где K является строго монотонной, и обеспечивается возможность расчета формируемой яркости структурированной засветки I^{out} на основе зарегистрированной I^{in}.

Для восстановления приемно-передаточной функции измерительного тракта в заданном элементе матрицы фотоприемника формируют I^{out} и регистрируют I^{in} серию из N изображений с линейным увеличением яркости до 255 (рис. 1):

$$I_i^{out} = \frac{255 \cdot (i+1)}{N}. \tag{2}$$

В восстановленной зависимости I^{in} от I^{out} реализуется поиск индексов S^*, E^* начала и конца наиболее длинного строго монотонного участка (рис. 2, а):

$$S^*, E^* = \underset{i,j}{\operatorname{argmax}} \left(j - i \,|\, I_k^{in} < I_{k+1}^{in} \; \forall k \in \{ i \ldots j-1 \} \right). \tag{3}$$

Для минимизации погрешности восстановления I^{out} на основе I^{in} в условиях внешних аддитивных шумов реализуется пороговая фильтрация найденного строго монотонного участка по значению первой производной (рис. 2, б):

$$S = \underset{i, i \geq S^*}{\operatorname{argmin}} \left(i \left| \frac{I_{i+1}^{in} - I_i^{in}}{I_{i+1}^{out} - I_i^{out}} > thresh \right. \right), \tag{4}$$

$$E = \underset{i, i \leq E^*}{\operatorname{argmax}} \left(i \left| \frac{I_i^{in} - I_{i-1}^{in}}{I_i^{out} - I_{i-1}^{out}} > thresh \right. \right). \tag{5}$$

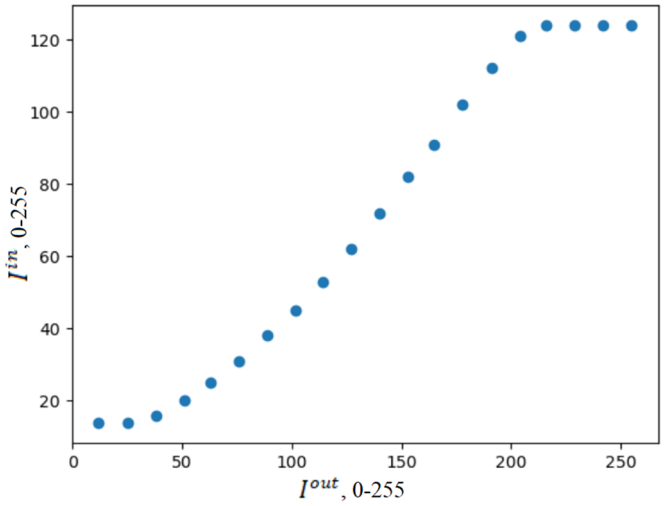
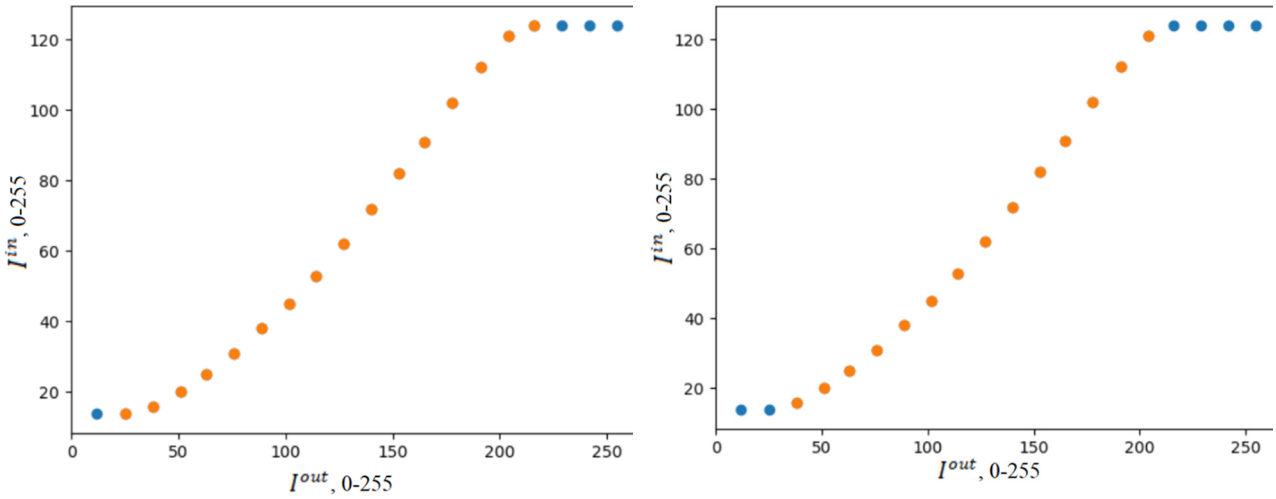


Рис. 1. Восстановление приемно-передаточной функции на основе 20 точек



а) *б*)

Рис. 2. Поиск рабочего диапазона приемно-передаточной функции на основе фильтраций по строгой монотонности (а) и первой производной (б)

Расчет порогового значения *thresh* реализуется на основе среднего значения первой производной приемно-передаточной функции в диапазоне $\left[I_{in}^{S^*}, I_{in}^{E^*} \right]$:

$$thresh = \frac{I_{E^*}^{in} - I_{S^*}^{in}}{2 \cdot \left(I_{E^*}^{out} - I_{S^*}^{out} \right)}. \quad (6)$$

В результате работы разработанного метода адаптивной корректировки приемно-передаточной функции K восстанавливаются ее рабочий участок $\left[I_S^{in}, I_E^{in} \right]$ и взаимно-однозначное соответствие между яркостями на формируе-

мом и регистрируемом изображениях. В ходе работы метода фазовых шагов при регистрации яркости I^{in} в диапазоне $\left[I_S^{in}, I_E^{in}\right]$ однозначно восстанавливается значение яркости на формируемом структурированном изображении $K^{-1}\left(I^{in}\right)$.

Восстановление фазового распределения при неравномерных сдвигах фазы

Применение метода фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции *K* для измерения трехмерной геометрии контролируемого объекта требует восстановления фазового распределения в условиях неравномерных фазовых сдвигов. При регистрации яркости I^{in} вне рабочего диапазона $\left[I_S^{in}, I_E^{in}\right]$ отсутствует возможность восстановления значения яркости на формируемом структурированном изображении I^{out} с помощью K^{-1}. В результате в ходе работы метода фазовых шагов при регистрации яркости I_i^{in} в диапазоне $\left[I_S^{in}, I_E^{in}\right]$ в итоговое распределение I^{reg} сохраняют значение формируемой яркости $K^{-1}\left(I_i^{in}\right)$ и соответствующее значение фазового сдвига $\Delta\varphi_i$.

Для восстановления фазового распределения φ на основе наборов восстановленных значений яркости I_i^{reg} и соответствующих им фазовых сдвигов $\Delta\varphi_i$ учитывается гармонический характер распределения I^{reg}:

$$\sin\left(\varphi + \Delta\varphi_i\right) = k \cdot I_i^{reg} + b. \tag{7}$$

Поиск целевого значения φ реализуется путем равномерного разбиения интервала поиска, детектирования участка с наименьшим значением метрики, сужения интервала поиска и цикличного повторения вышеописанной последовательности (рис. 3).

На каждой итерации поиска φ производится расчет коэффициентов *k* и *b*:

$$k = \frac{\sum_{i=0}^{M-2} \frac{\sin\left(\varphi + \Delta\varphi_{i+1}\right) - \sin\left(\varphi + \Delta\varphi_i\right)}{I_{i+1}^{reg} - I_i^{reg}}}{M - 1}, \tag{8}$$

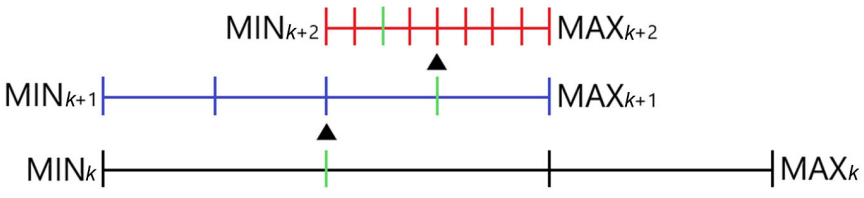


Рис. 3. Демонстрация работы метода итеративного сужения интервала поиска φ

$$b = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sin\left(\varphi + \Delta\varphi_i\right) - k \cdot I_i^{reg}}{M}, \quad (9)$$

где M – размер выборки I^{reg}.

В качестве метрики оптимальности расшифровки φ используется стандартное отклонение *STD* набора I^{diff}:

$$I_i^{diff} = \sin\left(\varphi + \Delta\varphi_i\right) - k \cdot I_i^{reg} - b, \quad (10)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-1}\left(I_i^{diff} - \frac{\sum_{j=0}^{M-1} I_i^{diff}}{M}\right)^2}{M}}. \quad (11)$$

Наилучшему результату расшифровки φ соответствует минимум используемой метрики.

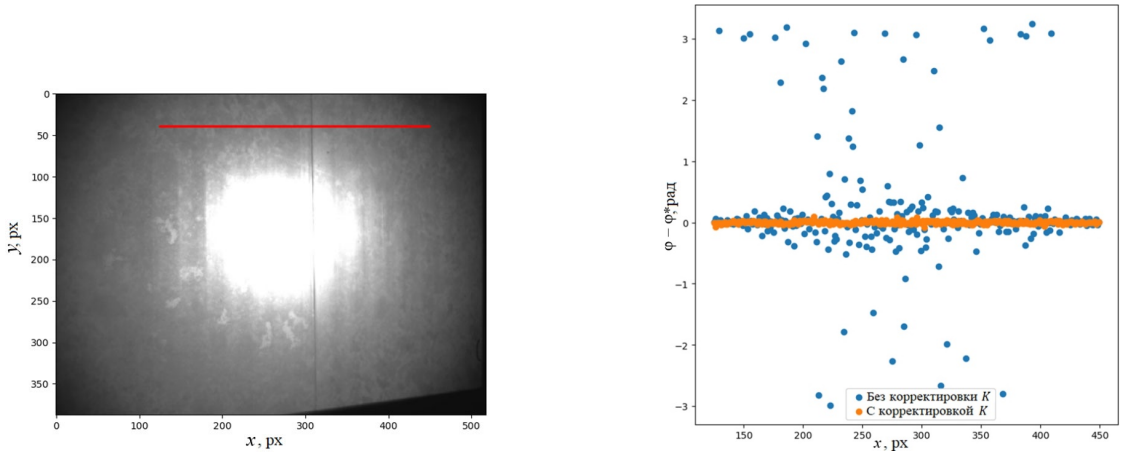
В результате путем настройки количества итераций сужения интервала поиска φ обеспечена возможность расшифровки фазового распределения с заданной погрешностью в условиях неравномерных сдвигов фазы.

Экспериментальные результаты

Выполнено экспериментальное исследование эффективности разработанного метода расшифровки фазового распределения с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта и компенсацией ее нелинейности и немонотонности.

Измерительная система включала цифровой проектор TouYinGer Q10 FullHD 1080p и фотоприемник Imaging Source DMx 72BUC02 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP. В элементах матрицы фотоприемника восстановлены зависимости регистрируемой I^{in} от проецируемой I^{out} яркости (рис. 1). Сгенерированы 50 формируемых источником излучения изображений фазовых сдвигов с частотой 50 и разрешением 1280×720. Путем изменения их разрешения до 518×388 и применения ранее восстановленных в элементах матрицы фотоприемника приемно-передаточных функций получен набор зарегистрированных фотоприемником изображений. С разрешением 518×388 также сохранено исходное фазовое распределение. На основе зарегистрированных фотоприемником изображений восстановлено фазовое распределение с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции измерительного тракта и без нее. В установлен-

ном горизонтальном пиксельном срезе размером 325 элементов (рис. 4, а) выполнен анализ отклонения восстановленного значения фазы от истинного (рис. 4, б).



а) *б*)

Рис. 4. Отклонение восстановленного фазового распределения от истинного *б*) в заданном пиксельном срезе матрицы фотоприемника *а*)

В результате среднеквадратичное отклонение восстановленного фазового распределения от истинного без учета нелинейности приемно-передаточной функции составило ~ 0,87 рад, а с ее адаптивной корректировкой ~ 0,02 рад.

Заключение

В работе предложен метод измерения трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции с адаптивной к светорассеивающим свойствам поверхности корректировкой приемно-передаточной функции. Применение разработанного метода адаптивной корректировки приемно-передаточной функции измерительного тракта обеспечивает учет ее нелинейности и строгой немонотонности в условиях ограниченного динамического диапазона источника и приемника оптического излучения. Экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенного метода расшифровки фазового распределения с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции и демонстрируют возможность на порядок снизить погрешность измерений методом фазовой триангуляции. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов со светорассеивающими свойствами в широком диапазоне.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. Двойнишников С.В. Многопараметрическая триангуляция геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах: дисс. ... доктора техн. наук: 05.13.18. – ИАиЭ СО РАН. – Новосибирск. – 2016. – 399 с.

3. Omidi P., Najiminaini M., Diop M., Carson J.J. Single-shot 4-step phase-shifting multispectral fringe projection profilometry //Optics Express. – 2021. – Т. 29. – №. 18. – С. 27975–27988.

4. Zuo C., Tao T., Feng S., Huang L., Asundi A., Chen Q. Micro Fourier transform profilometry (μFTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second //Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Т. 102. – С. 70–91.

5. Chen Y., Kemao Q. Phase-shifting algorithms with known and unknown phase shifts: comparison and hybrid //Optics Express. – 2022. – Т. 30. – №. 5. – С. 8275–8302.

6. Zuo C., Feng S., Huang L., Tao T., Yin W., Chen Q. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review //Optics and lasers in engineering. – 2018. – Т. 109. – С. 23–59.

7. Wang J., Wu Z., Huang Y., Yue H., Liu Y. A rapid and accurate gamma compensation method based on double response curve fitting for high-quality fringe pattern generation //Optics & Laser Technology. – 2023. – Т. 160. – С. 109084.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, В. А. Павлов, 2025

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-161-167

В. О. Зуев[1]✉, С. В. Двойнишников[1], Г. В. Бакакин[1], В. А. Павлов[1]

Адаптивный к оптическим свойствам поверхности триангуляционный контроль трехмерных деформаций

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена решению проблемы дистанционного контроля поля трехмерных деформаций в условиях динамичного изменения оптических свойств диагностируемой поверхности. Предложен комплекс методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций, обеспечивающий возможность адаптации к оптическим свойствам диагностируемой поверхности. Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхности с наличием характерных, отличительных особенностей предложен метод на основе анализа ее текстуры, детектирования двумерных векторов перемещений на изображении фотоприемника и их преобразования в трехмерное пространство. Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхности, текстура которой не содержит характерных, отличительных особенностей, предложен метод на основе анализа изменения ее пространственного положения. Результаты восстановления поля трехмерных деформаций сложнопрофильной металлической пластины предложенными методами подтверждают их работоспособность и возможность достижения погрешности на уровне 10^{-5} м. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность дистанционного контроля трехмерных деформаций поверхностей с оптическими свойствами в широком диапазоне.

Ключевые слова: поле трехмерных деформаций, адаптивный триангуляционный контроль

V. O. Zuev[1]✉, S. V. Dvoynishnikov[1], G. V. Bakakin[1], V. A. Pavlov[1]

Adaptive to surface optical properties three-dimensional deformations triangulation control

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vlad.zuev.0017@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the problem of three-dimensional deformation field remote control under conditions of dynamic changes in the diagnosed surface optical properties. To adapt to the diagnosed surface optical properties a set of three-dimensional deformation field triangulation control methods is proposed. For triangulation control of three-dimensional deformations field of the surface with characteristic, distinctive features, a method, based on texture analysis, two-dimensional displacement vectors in photodetector image detection and their transformation into three-dimensional space, is proposed. For triangulation control of three-dimensional deformations field of the surface without characteristic, distinctive features in its texture, a spatial position changes analysis method is proposed. The results of the three-dimensional deformation field reconstruction of a complex metal plate using the proposed methods confirm their operability and the possibility of achieving an accuracy of 10^{-5} m. The work results open up the possibility of three-dimensional deformations remote control of surfaces with optical properties in a wide range.

Keywords: three-dimensional deformations field, adaptive triangulation control

Введение

Прецизионный контроль геометрии объектов в машиностроении и энергетике требует разработки оптико-электронных измерительных систем с возможностями учета оптических свойств поверхности и компенсации нелинейных искажений измерительного тракта. Такие измерительные системы необходимы для дистанционного контроля трехмерных деформаций исследуемого объекта, изолированного в рабочем участке экспериментального стенда с оптическим доступом.

Среди оптико-электронных методов измерения трехмерной геометрии возможность проведения калибровки, исключающей необходимость расчета коэффициентов преломления сред, компенсирующей искажения трассы оптических лучей и дисторсии оптических элементов, обеспечивают триангуляционные методы на основе структурированного освещения [1]. Их развитие наиболее перспективно для разработки адаптивных к оптическим свойствам поверхности и нелинейным искажениям измерительных систем.

Одним из наиболее информативных инструментов контроля изменения геометрии объекта является измерение поля трехмерных деформаций [2-4]. Для контроля поля деформаций на основе результатов триангуляционных измерений зачастую детектируют смещения участков на изображениях фотоприемника и восстанавливают трехмерные векторы деформации с помощью калибровочных преобразований матричных координат в пространственные. К текстуре измеряемой поверхности объекта предъявляют требование наличия характерных, отличительных особенностей [5]. В случае их отсутствия на поверхность наносят специальные шаблоны или покрытия [2, 6, 7]. Подготовка контролируемой поверхности, выбор метода диагностики и установка параметров измерительной системы происходят перед началом испытаний. В результате отсутствие адаптивных методов регистрации структурированных изображений, их обработки и восстановления поля деформаций приводит к росту погрешности контроля геометрии объекта в условии динамичного изменения оптических свойств его поверхности.

Данная работа посвящена разработке комплекса методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций, обеспечивающего возможность адаптации к оптическим свойствам диагностируемой поверхности.

Метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа текстуры поверхности

Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхности с наличием характерных, отличительных особенностей предложен метод на основе анализа ее текстуры. Реализуется детектирование двумерных векторов перемещений на изображении фотоприемника и их последующее преобразование в трехмерное пространство.

Детектирование двумерных векторов перемещений участков поверхности на изображении фотоприемника реализуется на основе пространственно-временного корреляционного анализа. Анализируется область изображения объекта до дефор-

мации размером $(W \times H)$ с координатами центра (x_0, y_0) и распределением яркости $I_0(x, y)$. На изображении объекта после деформации рассматриваются области размером $(W \times H)$ с распределением яркости $I_d(x, y)$ и координатами центра (x_i, y_i), лежащими в интервалах по *X*: $[x_0 - MaxShift_X; x_0 + MaxShift_X]$ и по *Y*: $[y_0 - MaxShift_Y; y_0 + MaxShift_Y]$, где $MaxShift_X$ и $MaxShift_Y$ – установленные оператором значения максимальных сдвигов участков поверхности на изображении фотоприемника. Для каждой рассматриваемой области рассчитывается и сохраняется значение коэффициента корреляции Пирсона:

$$r(I_0, I_d) = \frac{c(I_0, I_d)}{\sqrt{s_{I_0}^2 s_{I_d}^2}}, \tag{1}$$

$$c(I_0, I_d) = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} \left(I_0(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - \overline{I_0} \right) \left(I_d(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - \overline{I_d} \right), \tag{2}$$

$$s_{I_0}^2 = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} \left(I_0(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y) - \overline{I_0} \right)^2, \tag{3}$$

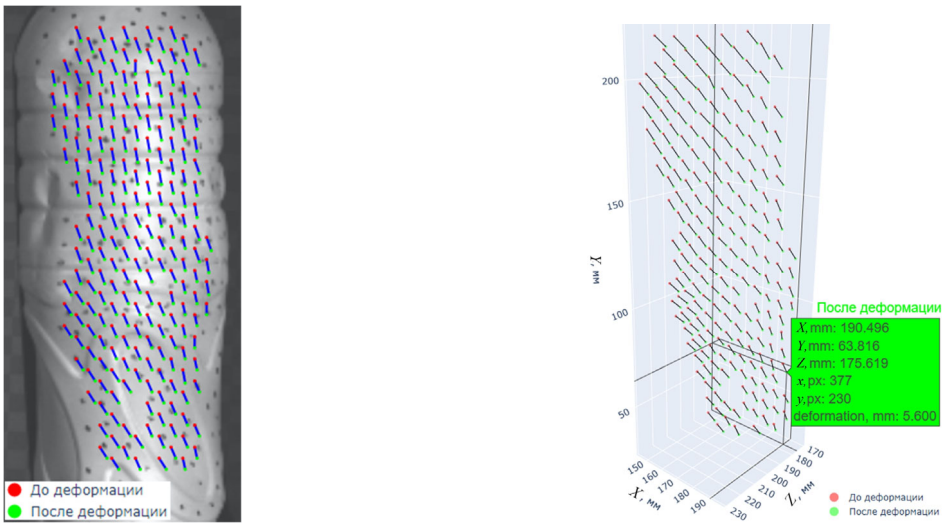
$$s_{I_d}^2 = \sum_{\Delta x} \sum_{\Delta y} \left(I_d(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - \overline{I_d} \right)^2, \tag{4}$$

где $\Delta x \in \left[-\frac{W}{2}; \frac{W}{2} \right]$, $\Delta y \in \left[-\frac{H}{2}; \frac{H}{2} \right]$, $\overline{I_0}$ и $\overline{I_d}$ – средние значения яркости в областях на изображениях объекта до и после деформации, соответственно. В интервалах по *X*: $[x_0 - MaxShift_X; x_0 + MaxShift_X]$ и по *Y*: $[y_0 - MaxShift_Y; y_0 + MaxShift_Y]$ находятся координаты (x_d, y_d) точки с максимальным значением коэффициента корреляции Пирсона *r*, которые принимаются в качестве оценки координаты анализируемого участка поверхности на изображении после деформации.

Для контроля достоверности найденных координат (x_d, y_d) предложен метод пороговой фильтрации. Вектор смещения участка поверхности на изображении фотоприемника $(x_0, y_0) \rightarrow (x_d, y_d)$ считается найденным, если коэффициент выраженности максимума корреляции $R > R_{thresh}$:

$$R = \frac{\sum_x \sum_y (r_{xy} - r_{min})}{(2 \cdot MaxShift_X + 1)(2 \cdot MaxShift_Y + 1)(r_{max} - r_{min})}, \quad (5)$$

где R_{thresh} – установленное оператором пороговое значение в диапазоне [0; 1], (x, y) – координаты на изображении фотоприемника, $x \in [x_0 - MaxShift_X; x_0 + MaxShift_X]$, $y \in [y_0 - MaxShift_Y; y_0 + MaxShift_Y]$, $r_{xy} = r(I_0, I_d)$, где центр области I_d соответствует координатам (x, y), r_{min} и r_{max} – минимальное и максимальное значения коэффициента корреляции Пирсона в анализируемых границах по x и y.



а) *б*)

Рис. 1. Демонстрация работы метода триангуляционного контроля трехмерных деформаций *б*) на основе анализа текстуры поверхности *а*)

Восстановление трехмерных векторов деформации (рис. 1, б) реализовано на основе найденных смещений участков поверхности на изображении фотоприемника (рис. 1, а) $(x_0, y_0) \rightarrow (x_d, y_d)$ и информации о трехмерных координатах объекта до (X_0, Y_0, Z_0) и после (X_d, Y_d, Z_d) деформации в соответствующих матричных элементах, полученной в ходе триангуляционных измерений трехмерной геометрии.

Метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа изменения пространственного положения поверхности

Для триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций поверхностей, текстура которых не содержит характерных, отличительных особенностей, а нанесение маркеров нежелательно или невозможно, предложен метод расчета

локальной деформации на основе восстановления полигональной поверхности и анализа изменения ее положения.

Работа предложенного метода расчета локальной деформации включает следующие итерации:

1) восстановление полигональных поверхностей объекта до и после деформации;

2) адаптивная фильтрация полигонов;

3) построение карты нормалей;

4) расчет локальных деформаций на основе расстояния от анализируемого полигона исходной поверхности до ближайшего по направлению нормали полигона деформированной поверхности (рис. 2).

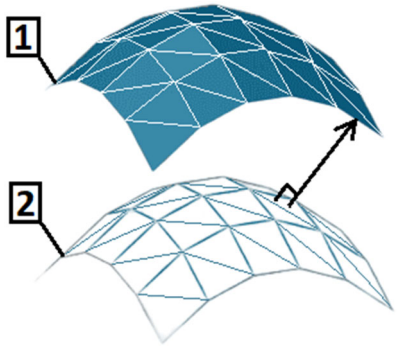


Рис. 2. Демонстрация работы метода триангуляционного контроля трехмерных деформаций на основе анализа изменения пространственного положения поверхности

Для восстановления полигональной поверхности объекта разработан метод сшивки в полигоны трехмерных точек объекта, полученных в ходе триангуляционного измерения трехмерной геометрии. Используя структурированность трехмерных точек (X,Y,Z) по изображению фотоприемника (x_c, y_c), для каждой координаты (x_c, y_c) восстанавливаются 2 полигона:

$$Polygon_1 = \{v_1, v_2, v_3\}, \tag{6}$$

$$Polygon_2 = \{v_1, v_3, v_4\}, \tag{7}$$

где v_1, v_2, v_3, v_4 – трехмерные координаты точек в элементах матрицы фотоприемника с координатами (x_c, y_c), (x_{c+1}, y_c), (x_{c+1}, y_{c+1}), (x_c, y_{c+1}), соответственно.

В ходе итерирования по полигонам исходной поверхности на каждом шаге рассчитывается значение локальной деформации, соответствующее расстоянию до ближайшего по направлению нормали полигона деформированной поверхно-

сти. Полученное значение деформации сохраняется в координатах матрицы фотоприемника, соответствующих координатам вершин полигона на изображении. В результате восстанавливается двумерное поле деформации по изображению фотоприемника (рис. 3, б).

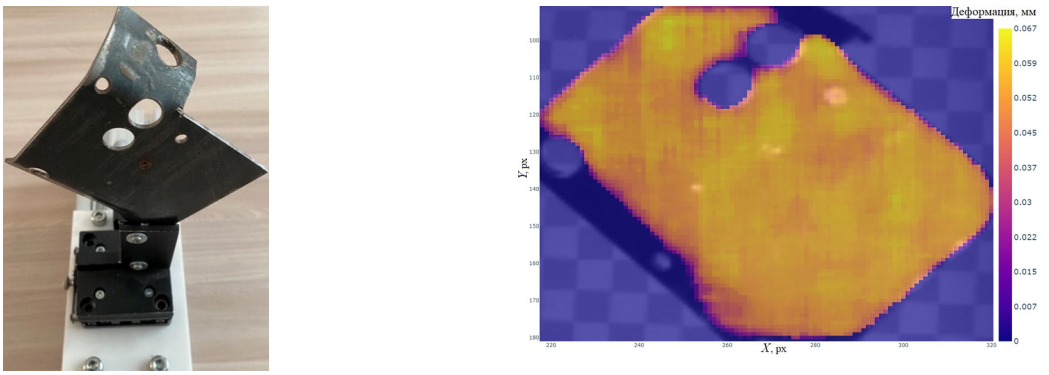
Достоинством разработанного метода контроля поля трехмерных деформаций является отсутствие ограничений, связанных с текстурой диагностируемой поверхности. Недостатком предложенного метода является его ограниченная применимость в задачах контроля продольных трехмерных деформаций.

Экспериментальные результаты

Для анализа работоспособности и погрешностей предложенных методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций выполнено экспериментальное тестирование и обработка полученных данных.

Измерительная система включала цифровой проектор TouYinGer Q10 FullHD 1080p и фотоприемник Imaging Source DMM 25GP031-ML с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP и программно установленным разрешением 518×388. В качестве экспериментального объекта выбрана сложнопрофильная металлическая пластина, жестко закрепленная в зажим механизма линейного перемещения с шагом 10 мкм (рис. 3, а).

Выполнены измерение трехмерной геометрии контролируемой пластины методом фазовой триангуляции [8], линейное перемещение объекта на 50 мкм для моделирования деформации и повторное измерение. В результате обработки трехмерной геометрии контролируемого объекта до и после деформации восстановлены поля трехмерных деформаций (рис. 3, б) разработанными методами. В методе триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа текстуры поверхности размеры W и H установлены в 21 пиксель, а пороговое значение $R_{thresh} = 0,5$. Среднее значение и среднеквадратичное отклонение деформации в восстановленных полях составили 54 мкм и 11 мкм, соответственно.



а) б)

Рис. 3. Восстановленное поле трехмерных деформацией *б*) сложнопрофильной металлической пластины *а*)

Заключение

В работе предложен комплекс методов триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций, обеспечивающий возможность адаптации к оптическим свойствам диагностируемой поверхности. Разработаны методы триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций в условиях наличия и отсутствия характерных, отличительных особенностей в текстуре контролируемой поверхности. Разработан метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций на основе анализа текстуры поверхности, детектирования двумерных векторов перемещений на изображении фотоприемника и их последующего преобразования в трехмерное пространство. Разработан метод триангуляционного контроля поля трехмерных деформаций без анализа текстуры поверхности на основе детектирования изменения ее пространственного положения. Экспериментальные результаты подтверждают возможность контроля трехмерных деформаций предложенными методами с погрешностью на уровне 10^{-5} м. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность дистанционного контроля трехмерных деформаций исследуемых поверхностей с оптическими свойствами в широком диапазоне.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Narasimhan S.G., Nayar S.K. Structured light methods for underwater imaging: light stripe scanning and photometric stereo //Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. – IEEE, 2005. – С. 2610–2617.

2. Южина Т.Н. Высокоскоростное деформирование и разрушение некоторых пород древесины: дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Южина Т.Н. – ННГУ., Нижний Новгород., 2022. – 163 с.

3. Investigating the Strain and Degradation Parameters of Rapidly Discharging Lithium-ion Batteries using 3D Digital Image Correlation: [Электронный ресурс]. URL: https://www.correlatedsolutions.com/application/cid-battery-test-usc. (Дата обращения: 13.05.2025).

4. Printed Circuit Board (PCB) Measurement from Thermal Loading: [Электронный ресурс]. URL: https://www.correlatedsolutions.com/application/circuit-board. (Дата обращения: 13.05.2025).

5. Видеоэкстензометр: [Электронный ресурс]. URL: https://www.zwickroell.com/ru/aksessuary/ehkstenzometry/videoxtens/. (Дата обращения: 13.05.2025).

6. Федоров А.Е., Самарцев В.А., Гаврилов В.А., Вильдеман В.Э., Словиков С.В. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов //Российский журнал биомеханики. – 2009. – №. 4. – С. 78–84.

7. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Экспериментальные исследования влияния повышенных и высоких температур на прочностные и деформационные свойства комбинированных стеклоорганопластиков //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №. 1. – С. 104–117.

8. 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.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. А. Павлов, 2025

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-168-173

С. В. Двойнишников[1]✉, В. В. Рахманов[1], В. О. Зуев[1], Г. В. Бакакин[1]

Программно-аппаратная архитектура системы оптического контроля качества топливных таблеток

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: dv.s@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке программно-аппаратной архитектуры системы технического зрения для решения задач измерения геометрических размеров и контроля дефектов внешнего вида топливных таблеток. Предложенная программно-аппаратная архитектура системы оптического контроля качества топливных таблеток предусматривает возможность гибкого конфигурирования системы контроля, количества регистрирующих изображения фотоприемников, количества модулей синхронизации, компьютеров и размещение модулей обработки на различных компьютерах. Программно-аппаратная архитектура системы оптического контроля качества топливных таблеток обеспечивает 100% контроль корректного прохождения таблеток по транспортеру и контроль диагностики работы всех компонент системы технического зрения.

Ключевые слова: программно-аппаратная архитекрута, топливная таблетка, техническое зрение

S. V. Dvoynishnikov[1]✉, V. V. Rakhmanov[1], V. O. Zuev[1], G. V. Bakakin[1]

Hardware and software architecture of the optical system of quality control for fuel pellets

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: dv.s@mail.ru

Abstract. The work is devoted to the development of hardware and software architecture of the machine vision system for solving the problems of measuring geometric dimensions and monitoring the appearance defects of fuel pellets. The proposed hardware and software architecture of the fuel pellet optical quality control system provides for the possibility of flexible configuration of the control system, the number of image-recording photodetectors, the number of synchronization modules, computers and the placement of processing modules on different computers. The hardware and software architecture of the fuel pellet optical quality control system ensures 100% control of the correct passage of pellets along the conveyor and control of diagnostics of the operation of all components of the machine vision system.

Keywords: hardware and software architecture, fuel pellet, machine vision

Введение

Критически важным для бесперебойной и стабильной работы ядерных реакторов АЭС является качество используемого топлива, а именно таблеток из диоксида урана. Неверный размер или дефекты на поверхности таблеток ядерного топлива могут привести к локальному нарушению теплообмена и возник-

новению аварийной ситуации в реакторе [1]. Поэтому на этапе производства важно обеспечить автоматизированный 100% контроль качества топливных таблеток, который включает в себя высокоточный контроль геометрии и диагностику дефектов внешнего вида таблетки [2-3]. Дефекты внешнего вида таблеток могут быть в виде сколов, трещин на поверхности или дефекты механической обработки таблетки [4-5]. Для контроля размера таблетки необходимо выполнять высокоточные измерения высоты и диаметра с погрешностью менее 3 мкм [6].

Контроль качества топливных таблеток необходимо выполнять во время движения таблеток на конвейре (Линии) от узла шлифовки таблеток на узел укладки на паллеты. Таблетки движутся по Линии в один ряд с максимальной пропускной способностью Линии 3 таблетки в секунду.

Система оптического контроля качества топливных таблеток помимо контроля геометрии и отсутствия на поверхности таблеток дефектов должна контролировать корректность движения таблеток по Линии. В случае заклинивания или выпадения таблетки с транспортера Линия должна остановиться для исключения прохождения неправильно проконтролированной таблетки в зону укладки годной продукции.

Важной частью системы оптического контроля качества топливных таблеток является ее программно-аппаратная часть, которая должна выполнять функции взаимодействия с оптико-электронными компонентами системы, обрабатывать данные, поступающие от приемников изображения, исполнительным контроллером.

Цель данной работы заключается в разработке программно-аппаратной архитектуры системы технического зрения для решения задач измерения геометрических размеров и контроля дефектов внешнего вида топливных таблеток.

Функции системы оптического контроля

Основные функции системы технического зрения Линии: измерение диаметра топливной таблетки, измерение высоты таблетки, поиск и подсчет площади дефектов на боковой поверзхности, поиск и подсчет прощади дефектов обеих торцевых поверхностей, контроль за корректным движением таблеток по Линии.

Движение таблеток на линии управляется системой автоматизации на базе промыленного контроллера Siemens. Основные функции системы автоматизации Линии, связанные с системой технического зрения – получение информации о результатах измерения, получение инфомации о состоянии системы технического зрения и передача системе технчиеского зрения информации о выходе контролируемой таблетки из зоны системы технического зрения. Система технического зрения разположена в зоне контроля конвейерной линии для диагностики качества топливных таблеток.

Программно-аппаратная архитектура

Структура аппаратной части архитектуры системы технчиеского зрения представлена рис. 1. Аппаратная часть включает систему автоматизированного

управления Линией (САУЛ), промышленные компьютеры ПК1, ПК2, ПК3, на которых работают модули обработки данных М0 – М9, модули синхронизации МС1 – МС3, фотоприемники К1 – К9, сигнальные фотодатчики ФБ0, ФБ1, ФБ2, ФБ3, осветительные модули О1 – О3, счечтчик импульсов енкодера СИ, подключенный к ведущему валу транспортера таблеток.

Функциональные модули аппаратной части системы технического зрения расположены на линии контроля топливных таблеток, как показано на рис. 2. Подсистема контроля состоит из 4 узлов: узел контроля внешнего вида и задней торцевой поверхности У1, узел контроля геометрии таблетки У2, узел контроля боковой и передней торцевой поверхности У3, узел сбрасывания бракованных таблеток У4. Узел контроля внешнего вида и задней торцевой поверхности У1 содержит фотоприемники К1..К4, осветитель О1, сигнальный фотодатчик ФБ1. Узел контроля геометрии таблетки У2 содержит фотоприемник К5, осветитель О2, сигнальный фотодатчик ФБ2. Узел контроля боковой и передней торцевой поверхности У3 содержит фотоприемники К6..К9, осветитель О3, сигнальный фотодатчик ФБ3. Узел сбрасывания бракованных таблеток У4 содержит сигнальный фотодатчик ФБ0. Счетчик импульсов СИ подключен к енкодеру, закрепленному на валу, расположенном на узле контроля геометрии таблетки У2.

Программно-аппаратная часть системы технического зрения работает следующим образом. Топливная таблетка двигается по Линии и при входе в узел контроля внешнего вида и задней торцевой поверхности У1 генерирует импульс сигнального фотодатчика ФБ1. Модуль синхронизации МС1 с фиксированной задержкой D1 включает осветитель О1 на время Е1 и с другой фиксированной задержкой D3 открывает затвор фотоприемника К1, регистрирующего торцевую поверхность таблетки. Далее, с фиксированной задержкой D2 с момента регистрации импульса сигнального фотодатчика ФБ1 включает осветитель О1 на время Е2 и с другой фиксированной задержкой D4 открывает затвор фотоприемников К2, К3, К4. Зарегистрированные изображения получают модули обработки данных фотоприемников М2, М3, М4, М5, коотрые независимо обрабатывают полученные изображения, подсчитывают общее количество дефектов, найденных на каждом изображении, и передают результаты измерения в головной модуль обработки М0.

Топливная таблетки, проходя узел контроля геометрии таблетки У2, аналогично узлу У1 генерирует импульс сигнального фотодатчика ФБ2. Модуль синхронизации МС2 с фиксированной задержкой D5 включает осветитель О2 на время Е2 и с другой фиксированной задержкой D6 открывает затвор фотоприемника К5, регистрирующего изображение таблетки в контровом свете. Изображение анализируется модулем обработки данных фотоприемников М1, и результат измерения диаметра и высота таблетки передается в модуль М0.

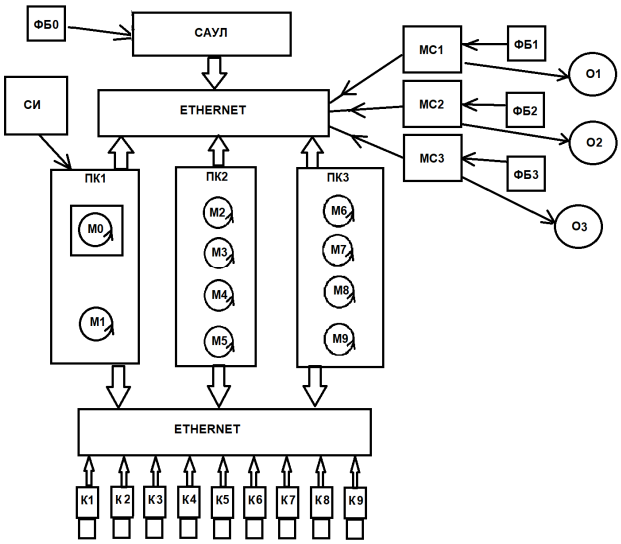


Рис. 1. Структура аппаратной части системы технического зрения

Далее, топливная таблетки, проходя узел контроля боковой и передней торцевой поверхности У3, аналогично узлу У1, регистрирует изображения таблетки фотоприемниками К6..К9, которые обрабатываются модулями обработки данных фотоприемников М6, М7, М8, М9, и результаты обработки передают модулю М0.

Головной модуль обработки данных М0 принимает результаты обработки изображений таблетки модулями М1..М9 и формирует итоговый результат контроля таблетки, в котором содержится информация о диаметре таблетки, ее высоте, годности по диаметру и высоте, код, определяющий фотоприемники, которые детектировали дефекты на поверхности таблетки, и годность таблетки по внешнему виду. Далее моудль М0 передает информацию о таблетке в систему автоматизированного управления Линией САУЛ.

Дополнительно, модуль М0 проверяет время задержек между регистрациями изображений различными фотоприемниками, опираясь на показания счетчика импульсов енкодера СИ, и, в случае некорректных задержек, сообщает об ошибке системе автоматизированного управления Линией САУЛ.

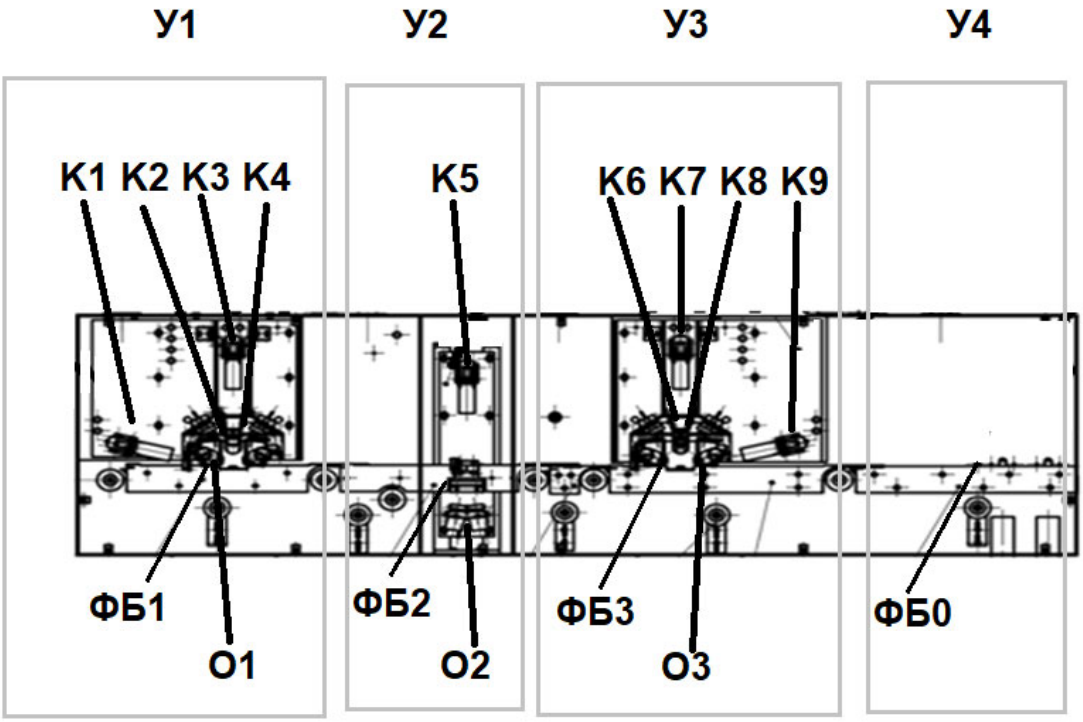


Рис. 2. Расположение функциональных моулей на узле технического зрения

При вхождении топливной таблетки в узел сбрасывания бракованных таблеток У4, система автоматизированного управления Линией САУЛ принимает сигнальный импульс от фотодатчика ФБ0 и передает информацию о регистрации таблетки в зоне сдува головному модулю обработки данных М0. Модуль обработки данных М0 проверяет время прихода таблетки в узел У4 и в случае неверного времени сообщает об ошибке системе автоматизированного управления Линией САУЛ.

Заключение

Разработанная программно-аппаратная архитектура системы оптического контроля качества топливных таблеток предусматривает возможность гибкого конфигурирования размеров производсвенной линии, количества регистрирующих изображения фотоприемников, количества модулей синхронизации, компьютеров и размещение модулей обработки на различных компьютерах. Программно-аппаратная архитектура системы оптического контроля качества топливных таблеток обеспечивает 100% контроль корректного прохождения таблеток по транспортеру и, в случае заклинивания таблетки или ее несанкционированного опрокидывания, будет выполнена аварийная остановка Линии для устранения проблемы оператором. Разработанная программно-аппаратная архитектура реализована в составе линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток с производительностью более 3 таб-

леток в секунду, погрешностью измерения диаметра менее 3 мкм, достоверностью контроля внешнего вида и геометрических размеров более 99,5%. Линия успешно работает в непрерывном режиме в цехе по производству таблеток уранового производства АО УМЗ, г. Усть-Каменогорск.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С., Горский В.В. Казеннов Ю.И., Меньшикова Т.С., Никулина А.В., Романеев В.В. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

2. Финогенов Л.В., Белобородов А.В., Ладыгин В.И., Чугуй Ю.В., Загоруйко Н.Г., Гуляевский С.Е., Шульман Ю.С., Лавренюк П.И., Пименов Ю.В. Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток // Дефектоскопия. – 2007. – № 10. – С. 68–79.

3. Власов Е.В., Белобородов А.В., Завьялов П.С., Сырецкий Д.Г. Контроль внешнего вида торцов топливных таблеток в условиях конвейерного производства // Дефектоскопия. – 2023. – №7. – С. 33–43.

4. Бакакин Г.В., Двойнишников С. В., Павлов В.А., Рахманов В.В. Технология изготовления эталонных калибровочных имитаторов топливных таблеток реакторов водо-водяного типа // ИнтерЭкспо Гео-Сибирь, Т.8, №1, 2022. – С.94–98.

5. Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Павлов В.А. Способ изготовления и контроля качества имитаторов топливных урановых таблеток для настройки системы технического зрения контроля дефектов поверхности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №8 (122). – URL: https://research-journal.org/archive/8-122-2022-august/10.23670/IRJ.2022.122.17.

6. Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Кабардин И.К., Меледин В.Г., Семенов Д.О. Способ определения края объектов цилиндрической формы на изображении теневым методом размерного контроля // Автометрия, 2022. – №1. – С. 40-46.

© С. В. Двойнишников, В. В. Рахманов, В. О. Зуев, Г. В. Бакакин, 2025

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-174-177

С. В. Двойнишников[1]✉, В. В. Рахманов[1], В. А. Павлов[1], В. О. Зуев[1]

Метод контроля дефектов боковой и торцевой поверхности топливных таблеток

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: dv.s@mail.ru

Аннотация. Топливные таблетки из диоксида урана – ключевой элемент ядерной энергетики, они требуют строгого контроля качества на всех этапах производства. Появление даже незначительных дефектов на боковой или торцевой поверхности таблетки может привести к серьезным последствиям в процессе эксплуатации, включая снижение эффективности, утечки или даже аварийные ситуации. Цель данной работы заключается в разработке метода контроля дефектов боковой и торцевой поверхности топливных таблеток из диоксида урана, обеспечивающего эффективность разбраковки более 99,5% в реальном времени. В результате разработаны и практически реализованы наукоемкие алгоритмы реального времени для обработки и анализа оптических сигналов и изображений, обеспечившие требуемое быстродействие многоканального оптико-электронного информационно измерительного комплекса для контроля урановых топливных таблеток. Технология практически реализована в Линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток.

Ключевые слова: топливная таблетка, техническое зрение, дефекты внешнего вида

S. V. Dvoynishnikov[1]✉, V. V. Rakhmanov[1], V. A. Pavlov[1], V. O. Zuev[1]

Method of control of defects of the side and end surfaces of fuel pellets

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: dv.s@mail.ru

Abstract. Fuel pellets made of uranium dioxide are a key element of nuclear power, requiring strict quality control at all stages of production. The appearance of even minor defects on the side or end surface of a pellet can lead to serious consequences during operation, including reduced efficiency, leaks or even emergency situations. The purpose of this work is to develop a method for monitoring defects on the side and end surfaces of fuel pellets made of uranium dioxide, ensuring a rejection efficiency of more than 99.5% in real time. As a result, science-intensive real-time algorithms for processing and analyzing optical signals and images have been developed and practically implemented, ensuring the required speed of a multichannel optical-electronic information-measuring complex for monitoring uranium fuel pellets. The technology has been practically implemented in the Line for automated monitoring of the appearance and geometric dimensions of fuel pellets.

Keywords: fuel pellet, machine vision, defects in appearance

Введение

Топливные таблетки из диоксида урана – ключевой элемент ядерной энергетики, они требуют строгого контроля качества на всех этапах производства.

Появление даже незначительных дефектов на боковой или торцевой поверхности таблетки может привести к серьезным последствиям в процессе эксплуатации, включая снижение эффективности, утечки или даже аварийные ситуации [1].

В последние десятилетия объемы производства топливных таблеток значительно возросли, что обусловлено растущими потребностями в устойчивых источниках энергии и активным развитием новых технологий. Это также поставило перед производителями новые вызовы в области обеспечения качества выпускаемых топливных таблеток. Научные исследования и разработки в области контроля дефектов становятся особенно актуальными, поскольку выявление и устранение проблем на ранних стадиях позволяет минимизировать риски и снизить затраты на ремонт и обслуживание энергетической установки [2-3].

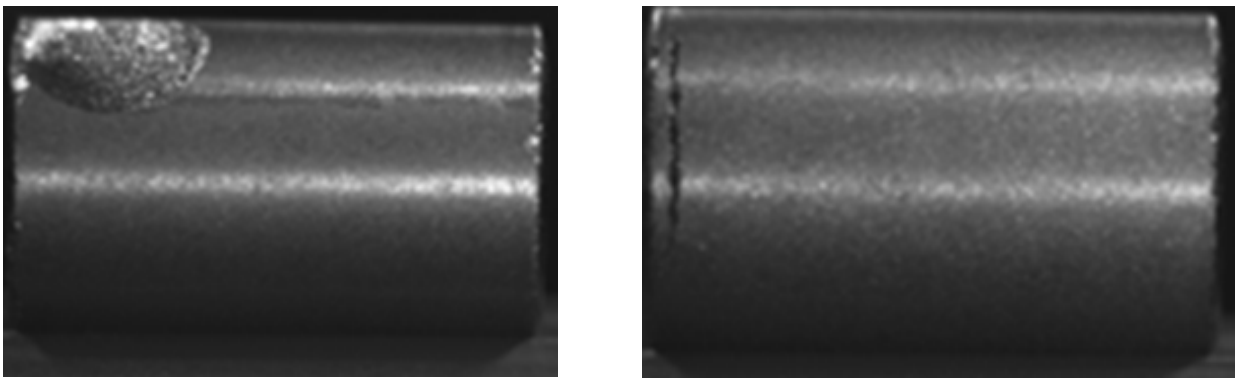
Дефекты внешнего вида таблеток могут быть в виде сколов, трещин на поверхности или дефекты механической обработки таблетки [4]. Существующие системы контроля дефектов внешнего вида таблеток имеют либо недостаточно высокую эффективность, либо не обеспечивают контроль всей боковой и торцевой поверхности таблетки, что может привести к попаданию таблетки с дефектами в годную продукцию.

Цель данной работы заключается в разработке метода контроля дефектов боковой и торцевой поверхностей топливных таблеток из диоксида урана, обеспечивающего эффективность разбраковки более 99,5% в реальном времени.

Описание метода контроля

Разработаны комплексные методы диагностики внешнего вида и геометрических параметров, предусматривающие создание измерительного комплекса, состоящего из 3 модулей. 1-й и 3-й выполняют поиск дефектов на боковой и торцевой поверхности, 2-й измеряет геометрию таблетки. Для формирования изображений используется пространственно-модулированное синхронное монохроматическое излучение и узкополосная оптическая фильтрация. Особенность данного комплекса заключается в механике движения таблеток. Транспортировка реализована таким образом, чтобы таблетка при перемещении от 1-го к 3-му узлу разворачивалась относительно оси на 180 градусов. Это обеспечивает реализацию контроля всей боковой поверхности таблетки.

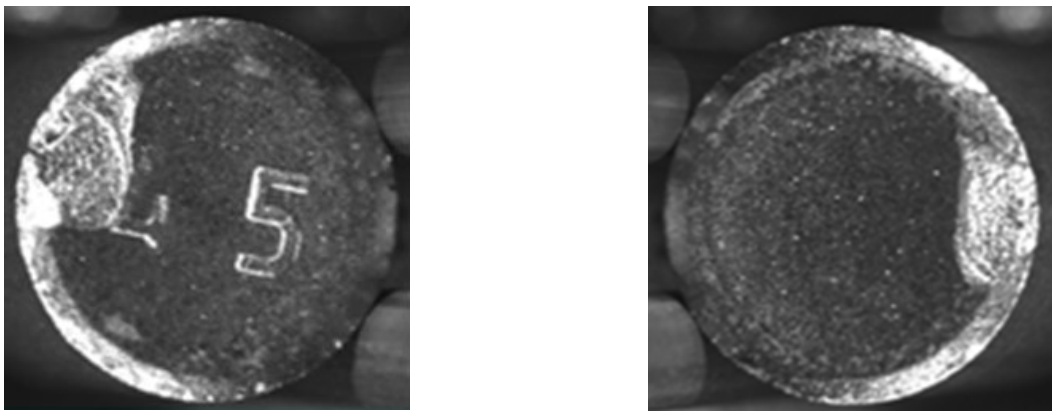
Контроль боковой поверхности (рис. 1) выполнен на основе анализа двухмерного распределения интенсивности и локальной дисперсии на изображении талетки, поиск дефектов и их многопараметрическая фильтрация с использованием алгоритмов искусственного интеллекта на основе формальных критериев, определяемых заказчиком.



а) *б*)

Рис.1. Примеры изображений боковой поверхности топливной таблетки с дефектом: а) таблетка со сколом; б) таблетка с трещиной

Контроль торцевой поверхности выполняется на основе анализа распределения интенсивности и дисперсии интенсивности на радиальном сегменте. Такой подход позволяет не анализировать изображение маркировки таблетки, нанесенное на один из торцов (рис. 2).



а) *б*)

Рис.1. Примеры изображений торцевой поверхности топливной таблетки с дефектом: а) торец с маркировкой; б) торец без маркировки

Алгоритм калибровки включает несколько этапов. На первом этапе формируется распределение интенсивности и дисперсии интенсивности поверхности таблетки без дефектов. На втором этапе калибровки выполняется поиск порогового критерия принятия решения о дефектности таблетки на основе статистического анализа экспериментальных данных.

Практическая реализация

Выполнена практическая реализация предложенных методов контроля внешнего вида топливных таблеток в составе линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток. Произво-

дительность линии более 3 таблеток в секунду. Погрешность измерения диаметра менее 3 мкм. Требуемая достоверность контроля более 99,5%.

Выполнена метрологическая аттестация созданной линии контроля таблеток. В ходе аттестации проанализировано почти 30000 таблеток. Установлено, что показатель достоверности визуального контроля топливных таблеток 99,73%.

Заключение

Разработаны методы оптического контроля дефектов поверхности урановых топливных таблеток на основе активной структурированной засветки, многоракурсной синхронной регистрации изображений и комплексного компьютерного многопараметрического анализа изображений. Разработаны и практически реализованы наукоемкие алгоритмы реального времени для обработки и анализа оптических сигналов и изображений, обеспечившие требуемое быстродействие многоканального оптико-электронного информационно измерительного комплекса для контроля урановых топливных таблеток. Технология практически реализована в Линии автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток. Линия автоматизированного контроля внешнего вида и геометрических размеров топливных таблеток принята в промышленную эксплуатацию в цехе по производству урановых таблеток АО «УМЗ», г. Усть-Каменогорск.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С., Горский В.В. Казеннов Ю.И., Меньшикова Т.С., Никулина А.В., Романеев В.В. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

2. Финогенов Л.В., Белобородов А.В., Ладыгин В.И., Чугуй Ю.В., Загоруйко Н.Г., Гуляевский С.Е., Шульман Ю.С., Лавренюк П.И., Пименов Ю.В. Оптико-электронная система автоматического контроля внешнего вида топливных таблеток // Дефектоскопия. 2007. – № 10. – С. 68–79.

3. Власов Е.В., Белобородов А.В., Завьялов П.С., Сырецкий Д.Г. Контроль внешнего вида торцов топливных таблеток в условиях конвейерного производства // Дефектоскопия. – 2023. – №7. – С. 33–43.

4. Бакакин Г.В., Двойнишников С.В., Рахманов В.В., Павлов В.А. Способ изготовления и контроля качества имитаторов топливных урановых таблеток для настройки системы технического зрения контроля дефектов поверхности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №8 (122). – URL: https://research-journal.org/archive/8-122-2022-august/10.23670/IRJ.2022.122.17.

© С. В. Двойнишников, В. В. Рахманов, В. А. Павлов, В. О. Зуев, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-178-185

А. М. Оборин[1]✉, К. С. Зубанов[1], С. В. Двойнишников[1]

Разработка программного обеспечения лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.oborin@g.nsu.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке программного обеспечения (ПО) для лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) без смещения частоты, предназначенного для бесконтактных измерений скорости частиц в газожидкостных потоках. Актуальность исследования обусловлена необходимостью высокоточного метрологического обеспечения экспериментов в области теплофизики, гидро- и аэродинамики без возмущения исследуемых процессов.Целью работы является создание кроссплатформенного ПО, обеспечивающего непрерывный сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени. Особенностью ЛДИС является использование адаптированной оптической схемы без квадратурной демодуляции и смещения частоты. Обработка сигнала включает частотную фильтрацию, спектральный анализ для определения доплеровской частоты и расчет скорости.Разработанное ПО позволяет проводить высокоточные измерения в научных и технических приложениях, обеспечивая удобный интерфейс для анализа данных в реальном времени.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, ЛДИС без смещения частоты, измерение скорости частиц, газожидкостные потоки, программное обеспечение, Avalonia

A. M. Oborin[1]✉, K. S. Zubanov[1], S. V. Dvoinishnikov[1]

Development of a laser doppler anemometer software without frequency shift

[1] Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.oborin@g.nsu.ru

Abstract. The work is devoted to the development of software for a laser Doppler velocity meter (LDIS) without frequency offset, designed for non-contact measurements of particle velocity in gas-liquid streams. The relevance of the study is due to the need for high-precision metrological support for experiments in the field of thermophysics, hydro and aerodynamics without disturbing the processes under study. The aim of the work is to create cross-platform software that provides continuous data collection, processing and analysis in real time. A special feature of LDIS is the use of an adapted optical circuit without quadrature demodulation and frequency offset. Signal processing includes frequency filtering, spectral analysis to determine the Doppler frequency, and velocity calculation. The developed software allows for high-precision measurements in scientific and technical applications, providing a user-friendly interface for real-time data analysis.

Keywords: laser Doppler anemometer, LDIS without frequency shift, particle velocity measurement, gas-liquid flows, software, Avalonia

Введение

Развитие современной науки и технологий требует создания высокоточных и надежных методов измерения параметров газожидкостных потоков. Одной из

важнейших задач в области теплофизики, гидро- и аэродинамики является измерение скорости частиц в потоке с высокой чувствительностью и точностью.

Современные методы измерения скорости потоков включают контактные и бесконтактные технологии. Контактные методы обладают рядом ограничений, включая внесение возмущений в поток и ограниченную точность при высоких скоростях. В свою очередь, бесконтактные методы, основанные на лазерной и оптической технике, обеспечивают высокую пространственную и временную разрешающую способность, что делает их предпочтительными для точных измерений в сложных потоковых средах.

Одним из эффективных инструментов для измерения скорости частиц в газожидкостных потоках является лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) [1,2]. Этот метод основан на регистрации доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного на движущихся частицах. ЛДИС обеспечивает высокую точность и чувствительность, не внося возмущений в исследуемый процесс.

Современный ЛДИС состоит из оптоэлектронного модуля, системы сбора данных и персонального компьютера с программным обеспечением. Особенность ЛДИС в данной работе заключается в использовании адаптированной оптической схемы, которая обеспечивает измерение скорости потока без смещения частоты оптического излучения и не использует квадратурную демодуляцию сигнала фотоприемника.

Целью работы является разработка программного обеспечения для ЛДИС, обеспечивающего непрерывный сбор, обработку и визуализацию данных о скорости частиц в газожидкостных потоках. Для этого решались задачи проектирования архитектуры системы, реализации алгоритмов обработки сигналов, интеграции с аппаратными модулями, разработки пользовательского интерфейса и тестирования на реальных экспериментальных установках.

Структура измерительного комплекса

Доплеровский метод, лежащий в основе лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС), использует явление смещения частоты лазерного излучения, рассеиваемого движущимся объектом. В отличие от классического эффекта Доплера, применяемого для измерения скорости крупных объектов, здесь метод ориентирован на определение скорости отдельных частиц в потоке посредством формирования интерференционной картины.

Отличительной характеристикой рассматриваемой оптической схемы (рис. 1) является использование стеклянного куба, состоящего из двух частей, разделенных специальным оптическим покрытием. Это покрытие выполняет функцию полупрозрачного зеркала, обеспечивающего разделение падающего лазерного излучения на два когерентных луча, что является ключевым условием для формирования стабильной интерференционной картины.

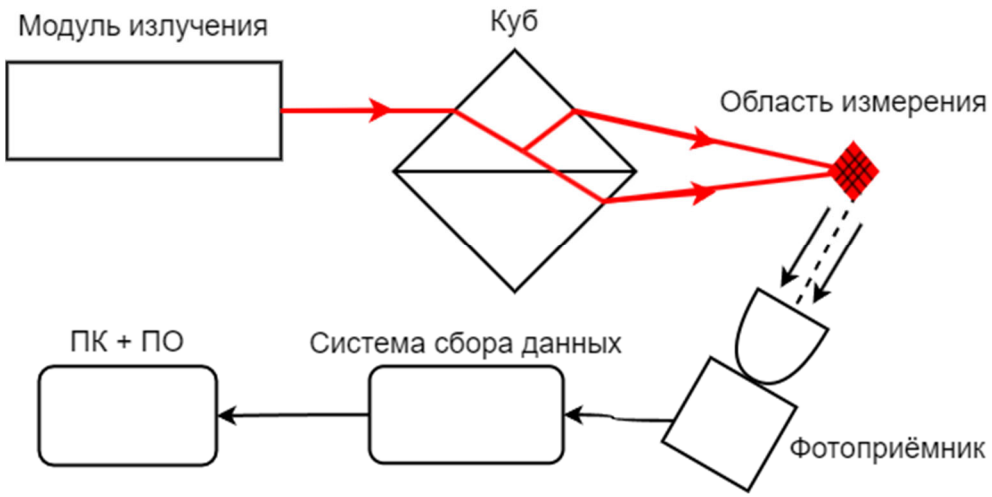


Рис. 1. Функциональная оптическая схема

В модуле излучения формируется лазерный луч, площадь сечения которого уменьшается с пройденным расстоянием вплоть до области перетяжки.

После прохождения стеклянного куба лазерный луч разделяется на два когерентных луча, распространяющихся по различным оптическим траекториям, после чего они встречаются в области перетяжки, образуя устойчивую интерференционную структуру. В этом участке их волновые фронты принимают плоскую форму, что обеспечивает создание высококонтрастной интерференционной картины, необходимой для дальнейшего анализа параметров оптического сигнала.

Фотоприемник направлен в сторону области перетяжки, регистрируя прохождение частицы через интерференционную картину. Он формирует сигнал, который передается в систему сбора данных для дальнейшей его обработки.

Разработанная измерительная система (рис. 2) состоит из оптоэлектронного модуля, системы сбора данных и персонального компьютера (ПК) с программным обеспечением на нем. Взаимодействие между первыми двумя происходит через коаксиальный кабель, взаимодействие с ПК – через USB.

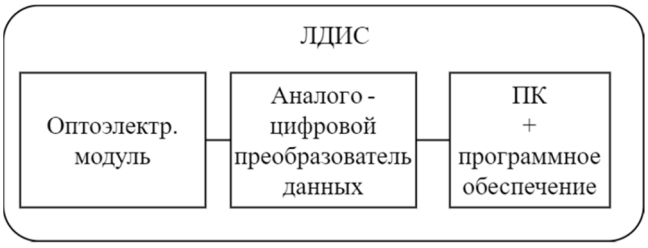


Рис. 2. Структура измерительного комплекса

В качестве системы сбора данных используется USB осциллограф LOTO OSC2002. Полоса пропускания составляет 50 МГц, разрядность – 8 бит, количество используемых каналов равняется одному.

Система сбора данных передает в ПК данные в виде фрагментированных пакетов. Формат пакетов реализован таким образом, что в одном пакете может передаваться один или несколько доплеровских сигналов. В зависимости от параметров USB осциллографа в один пакет можно вместить до 32 Кбайт данных. При этом скорость их передачи может достигать 3 Мбайт/с.

Реализованный модуль взаимодействия с системой сбора данных поддерживает протокол связи с USB осциллографом, отвечает за настройку режимов его работы, получает данные, приходящие от осциллографа, и складывает их в буфер для дальнейшей обработки. Также в USB осциллографе предусмотрен режим работы по триггеру, при котором передаваться будут только сигналы выше порогового значения.

Пользовательский интерфейс реализован на платформе .NET с использованием кроссплатформенного фреймворка Avalonia, что обеспечивает гибкость при дальнейшей адаптации системы. На текущем этапе разработка велась для платформы Windows, однако архитектурные решения и выбор технологий позволяют в будущем обеспечить поддержку Linux без значительных изменений в кодовой базе.

Внутренняя архитектура

Внутренняя архитектура отличается гибкостью и расширяемостью, позволяя модулям быть заменяемыми (рис. 3). Это актуально, так как вся система создается и отлаживается параллельно, любая компонента может измениться. Для обеспечения гибкости и расширяемости внутренней архитектуры необходимо создать «скелет» приложения, разделяющий программный модуль ЛДИС на минимально зависимые блоки. Каждый блок программы необходимо выполнять в отдельном потоке, для обеспечения максимальной производительности приложения.

Для обеспечения максимальной производительности диспетчер программы в непрерывном режиме получает и обрабатывает данные в двух разных потоках.

Реализованный алгоритм обработки входного сигнала разбит на несколько этапов. Каждый этап является абстрактным классом и может реализовывать различные алгоритмы.

Первоначально производится выделение пьедестала исходного сигнала с помощью фильтра низких частот, ширина окна которого зависит от параметров осциллографа. На следующем этапе происходит фильтрация низкочастотной составляющей, оставляя только доплеровский сигнал. Из доплеровского сигнала можно получить спектрограмму с помощью быстрого преобразования Фурье. С помощью спектрального анализа и метода подавления остаточной низкочастотной составляющей выделяем доплеровскую частоту в сигнале. Последним этапом является вычисление измеренной скорости по доплеровской частоте и известным параметрам осциллографа.

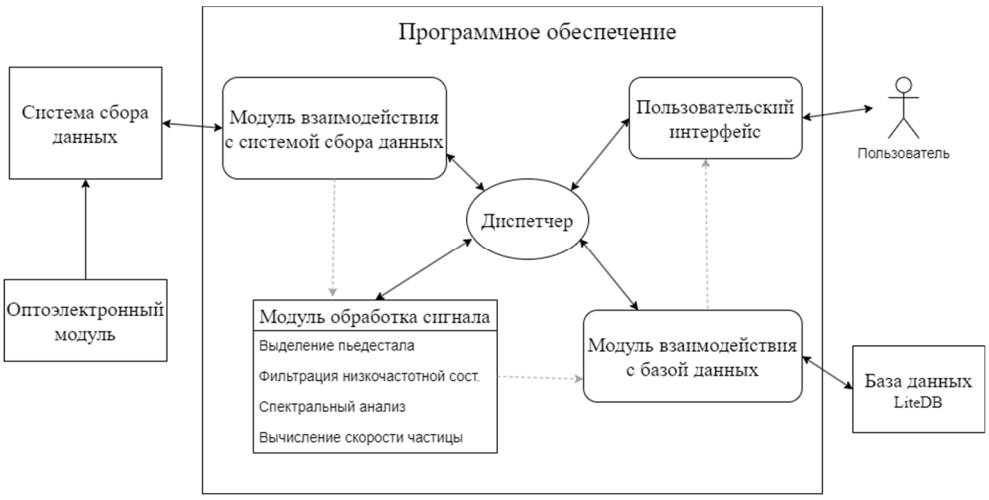


Рис. 3. Внутренняя архитектура программного модуля

Модуль базы экспериментов сохраняет результаты обработки полезного сигнала в базу данных для дальнейшего анализа. Быстрая запись результатов измерения ЛДИС реализована с помощью встроенной нереляционной базы данных LiteDB.

Тестирование

В ходе исследования выполнена калибровка лазерного доплеровского измерителя скорости с применением калибровочной платформы КЛАД-1 (рис. 4). Данная установка обеспечивает движение калибровочного объекта в диапазоне скоростей от 3 м/с до 24 м/с с погрешностью задания эталонной скорости не более 0,01%, что позволяет проводить высокоточную верификацию измерительной системы. Калибровка системы показала погрешность измерения скорости 0,21%, что соответствует требованиям к точности для подобных измерительных систем.

Для проверки корректности работы реализованных алгоритмов и функционала программного модуля ЛДИС без смещения частоты выполнено измерение скорости воздушного потока на выходе из сопла Витошинского (рис. 5). Для повышения уровня сигнала на фотоприемнике ЛДИС использовались светорассеивающие частицы аэрозоля глицерина. Компрессор создает воздушный поток, который проходит через генератор частиц аэрозоля глицерина, проходит через сопло Витошинского для стабилизации скорости и направления полета частиц после выхода из сопла.

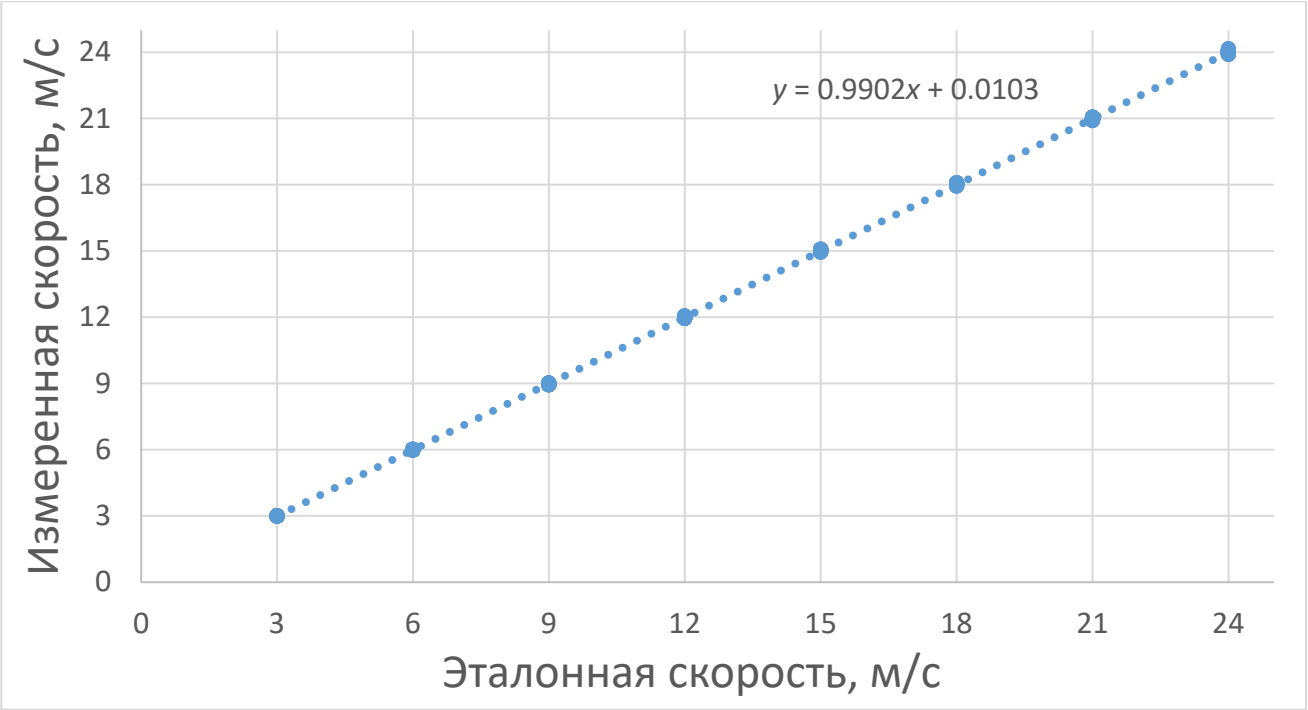


Рис. 4. Результаты калибровки ЛДИС

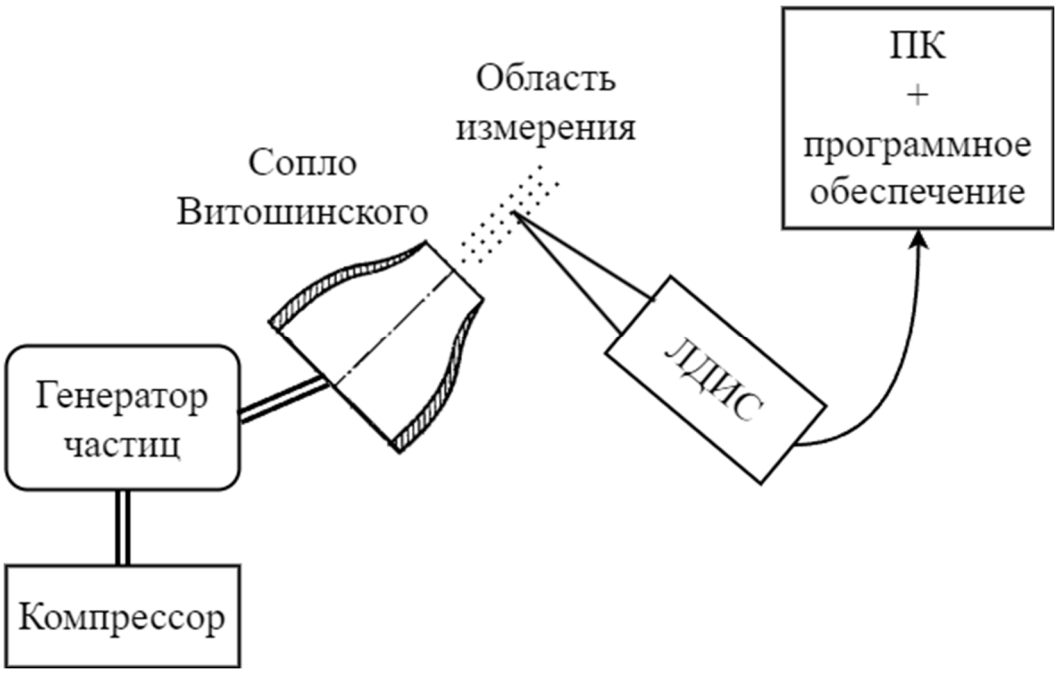


Рис. 5. Экспериментальный стенд

В ходе проведенных измерений установлено, что система демонстрирует стабильную работу при скоростях потока свыше 30 м/с. В результате измерена средняя скорость частиц в потоке, она составила 33,7 м/с (рис. 6).

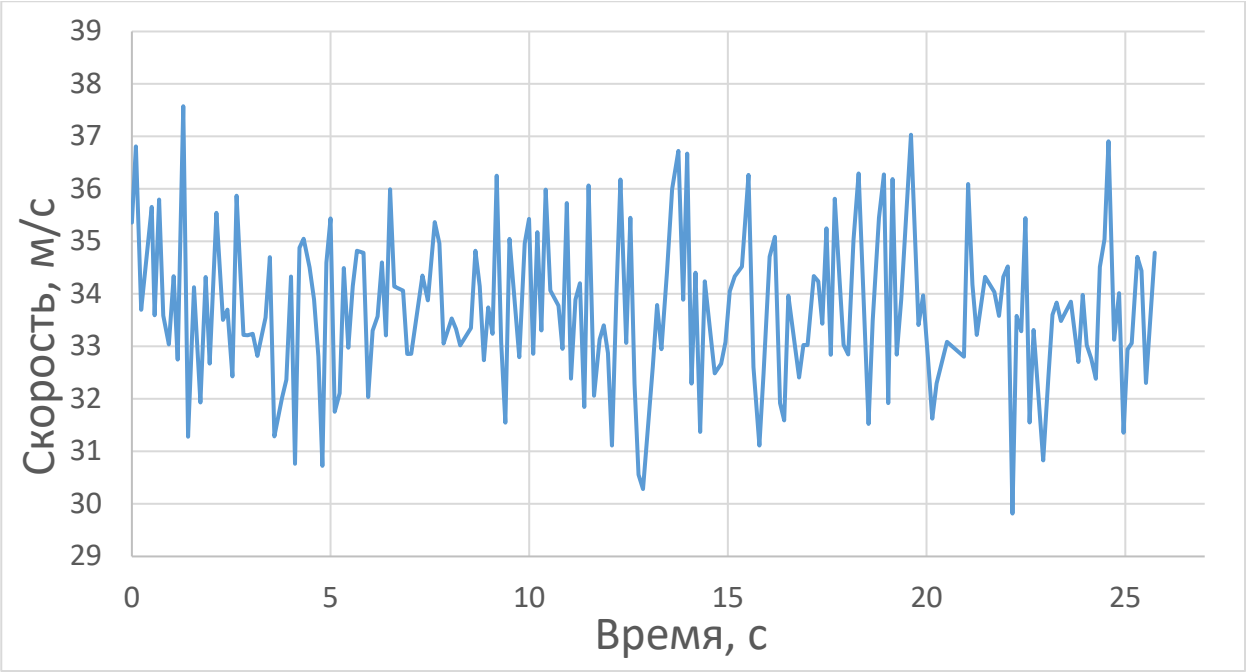


Рис. 6. Распределение скорости потока воздуха

Заключение

В ходе работы разработано программное обеспечение (ПО) для лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) без смещения частоты, обеспечивающее высокоточные измерения скорости частиц в газожидкостных потоках в режиме реального времени. Ключевой особенностью системы стало использование адаптированной оптической схемы, исключающей необходимость квадратурной демодуляции и смещения частоты лазерного излучения, что упростило аппаратную реализацию и повысило надежность измерений.

Реализованное ПО обеспечивает непрерывный сбор данных, их обработку с применением спектрального анализа для определения доплеровской частоты, а также сохранение результатов в базе данных. Алгоритмы обработки сигналов оптимизированы для работы в режиме реального времени, что подтверждено тестами на калибровочной платформе с погрешностью измерений 0,21%. Успешная демонстрация функционала выполнена при измерении скорости воздушного потока из сопла Витошинского, где среднее значение составило 33,7 м/с.

На текущем этапе разработка велась для платформы Windows, однако архитектурные решения и выбор технологий позволяют в будущем обеспечить поддержку Linux без значительных изменений в кодовой базе. Пользовательский интерфейс, разработанный с учетом современных требований, предоставляет инструменты для визуализации данных и экспорта результатов, что делает систему применимой в научных и промышленных исследованиях.

Разработанное ПО может быть использовано для диагностики потоков в энергетике, авиастроении и химической промышленности, где критически важны бесконтактные измерения с минимальным уровнем погрешности.

Перспективы развития системы связаны с расширением кроссплатформенной поддержки, оптимизацией алгоритмов, а также интеграцией с облачными сервисами для удаленного мониторинга.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин В.Г., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Садбаков О.Ю. и др. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-056 ЛМЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / Р5 134 00 00 00 . - Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО РАН, 2004.- 51 с.

2. Лазерные доплеровские измерители скорости / Ю.Г.Василенко, Ю.Н. Дубнищев, В.П. Коронкевич и др.; Отв. ред. Ю.Е. Нестерихин. - Новосибирск: Наука, 1975. – 164 с.

© А. М. Оборин, К. С. Зубанов, С. В. Двойнишников, 2025

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-186-191

И. А. Евдокименко[1]✉, Д. Е. Легостаев[1], К. А. Филиппский[1]

Особенности истечения газового пузыря через горизонтальный пучок труб в фиксированном объеме жидкости

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Аннотация. Возникновение двухфазных потоков в промышленных установках в некоторых случаях может приводить к аварийным сценариям. Наличие экспериментальной базы по движению таких потоков в различных системах позволяет создать протоколы безопасности для предотвращения таких ситуаций. Экспериментальная установка для исследования динамики газовых пузырей в нисходящем потоке включала канал с 55 горизонтальными стеклянными трубками, закрепленными между прозрачными трубными досками. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, подаваемая сверху вниз со скоростью 0-0,7 м/с. Газ (азот) инжектировался через капилляр из цилиндра постоянного объема ($3\cdot10^{-5}$-$7\cdot10^{-5}$ м³) при давлениях $202{,}65\cdot10^{3}$-$1{,}216\cdot10^{6}$ Па. Процесс фиксировался высокоскоростной камерой (500 к/с). Визуализация подтвердила сложный характер взаимодействия пузырей с трубным пучком. Выяснено, что при высоких давлениях впрыска пузыри могут «зависать» на трубках. Показано, что влияние объема цилиндра незначительно оказывает влияние на динамику всплытия.

Ключевые слова: отрывное течение, двухфазный пузырьковый поток, теневая съемка, пучок труб

I. A. Evdokimenko[1]✉, D. E. Legostaev[1], K. A. Filippskii[1]

Features of the outflow of a gas bubble through a horizontal bundle of pipes in a fixed volume of liquid

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Abstract. The occurrence of two-phase flows in industrial installations can in some cases lead to emergency scenarios. The availability of an experimental database on the movement of such flows in various systems makes it possible to create security protocols to prevent such situations. The experimental setup for studying the dynamics of gas bubbles in a downward flow included a channel with 55 horizontal glass tubes fixed between transparent pipe boards. Distilled water was used as the working fluid, supplied from top to bottom at velocities ranging from 0 to 0.7 m/s. Gas (nitrogen) was injected through a capillary from a constant-volume cylinder ($3\cdot10^{-5}$ to $7\cdot10^{-5}$ m³) at pressures of $202.65\cdot10^{3}$ to $1.216\cdot10^{6}$ Pa. The process was recorded using a high-speed camera (500,000 fps). Visualization confirmed the complex interaction between bubbles and the tube bundle. It was found that at high injection pressures, bubbles could "hang" on the tubes. Additionally, the study demonstrated that cylinder volume had negligible influence on bubble rise dynamics.

Keywords: separation flow, two-phase bubble flow, shadow imaging, tube bundle

Введение

Промышленные установки с горизонтальными пучками труб нашли свое применение во многих отраслях производства: авиа- и машиностроении, хими-

ческой технологии, а также в различных энергетических установках. К таким установкам относятся теплообменники, испарители, парогенераторы. Последние имеют большое значение в процессе выработки электроэнергии на атомных станциях, где их надежность влияет на безопасность работы станций.

Изучение двухфазных потоков имеет особое значение для совершенствования парогенераторов. В определенных условиях образование и развитие двухфазных потоков может приводить к различным аварийным сценариям. Например, истечение дисперсной фазы во время разрыва трубок парогенератора.

В работах [1, 2] показано, что поведение пузырей зависит от числа Мортона, числа Рейнольдса и свойств жидкости. В нисходящем потоке вязкость и поверхностное натяжение определяют форму и траекторию пузырей: в высоковязких средах пузыри сохраняют сферичность, а при низком поверхностном натяжении траектории становятся неустойчивыми [3]. Для горизонтальных пучков труб характерно сложное взаимодействие пузырей с ближайшими трубами, что приводит к их деформации и изменению скорости [4, 5]. В [6] рассмотрено влияние пузырей на теплообмен в теплообменных аппаратах с нисходящим потоком. Теплообмен в нисходящих потоках усиливается на 40–70% при объемной доле газа 5–15% за счет микроконвекции и обновления пограничного слоя.

Наличие экспериментальной базы о движении дисперсных структур в горизонтальном пучке труб позволит улучшить существующие протоколы безопасности, а также создать достоверные математические модели.

Целью данной работы является оценка влияния скорости потока, давления впрыска и объема цилиндра на динамику всплытия газового пузыря в нисходящем течении в канале с горизонтальным пучком труб.

Методы и материалы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Стенд состоит из 55 горизонтальных стеклянных трубок, расположенных в 3 ряда, закрепленных с помощью прозрачных трубных досок, изготовленных из оргстекла. Рабочая жидкость (дистиллированная вода) с помощью центробежного насоса подавалась в канал с горизонтальным пучком труб сверху вниз со скоростью от 0 до 0,7 м/с. В рамках эксперимента использовался баллон с сжатым азотом, из которого газ набирался в цилиндрическую емкость постоянного объема ($3 \cdot 10^{-5}$ и $7 \cdot 10^{-5}$ м^3) с заданным давлением от $202{,}65 \cdot 10^3$ до $1{,}216 \cdot 10^6$ Па. После заполнения цилиндра газ инжектировался в канал через капилляр, расположенный в центре модели парогенератора.

Визуализация истечения газового пузыря производилась при помощи высокоскоростной камеры со скоростью съемки 500 к/с и продолжительностью записи 6 секунд.

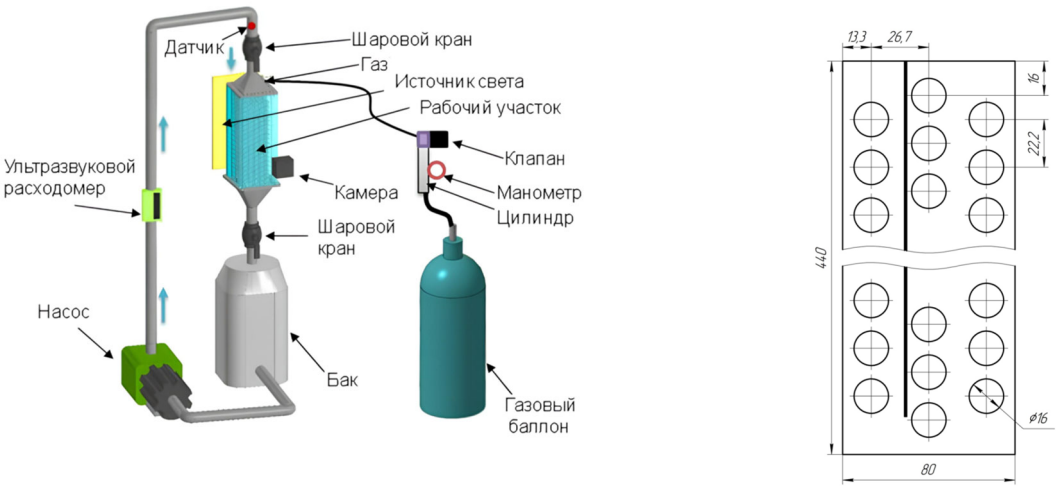


Рис. 1. Экспериментальная установка и схема рабочего участка

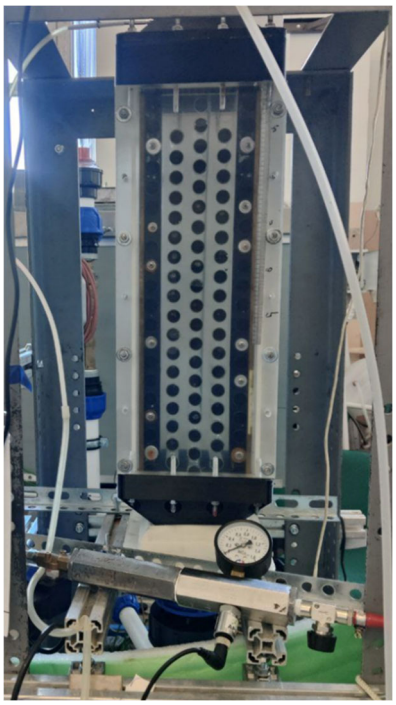
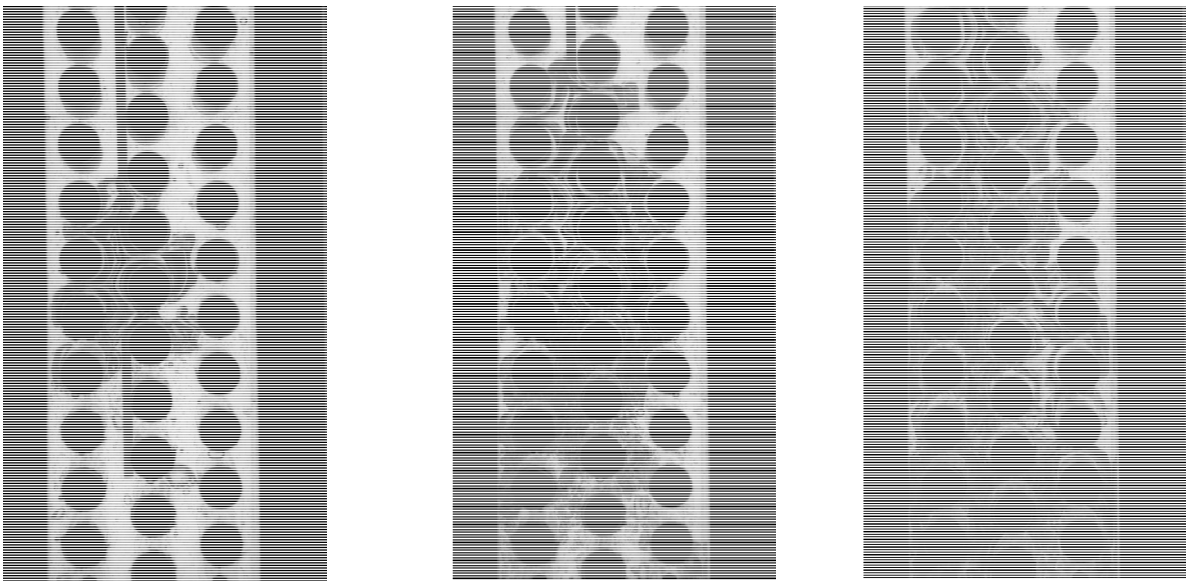


Рис. 2. Фотография модели парогенератора

Результаты

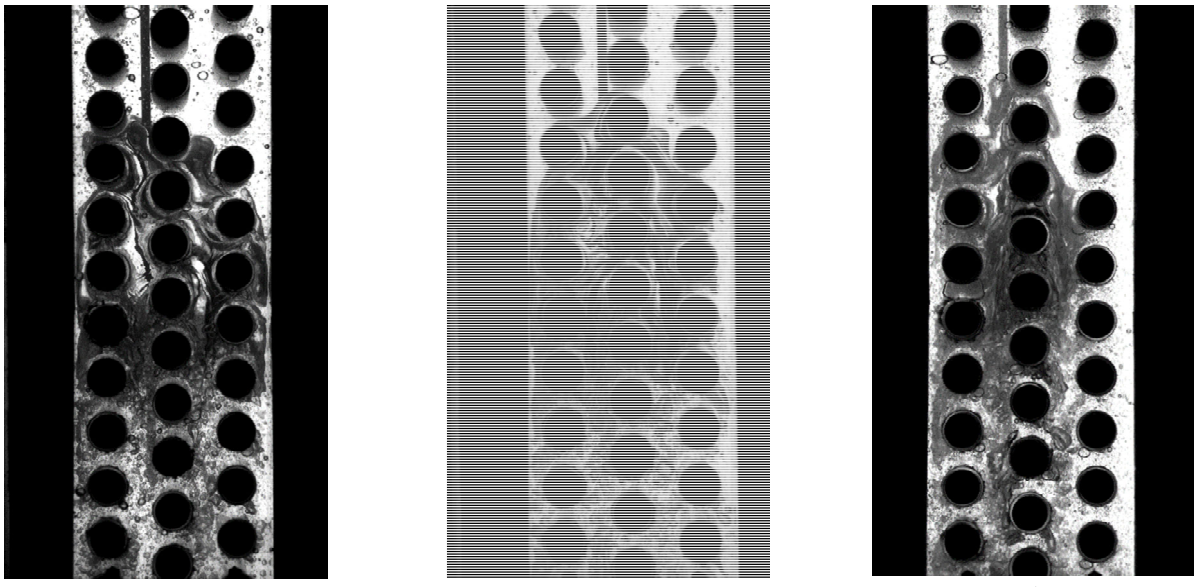
На рис. 3 представлены фотографии эволюции газового пузыря при его истечении из одиночного капилляра при скорости жидкости U_L=0 м/с при объеме цилиндра 30 мл и давлениях впрыска 2 атм , 7 атм и 12 атм.



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Фотографии пузырей в стоячей воде при объеме цилиндра 30 мл и давлениях впрыска 2 атм (а), 7 атм (б), 12 атм (в)

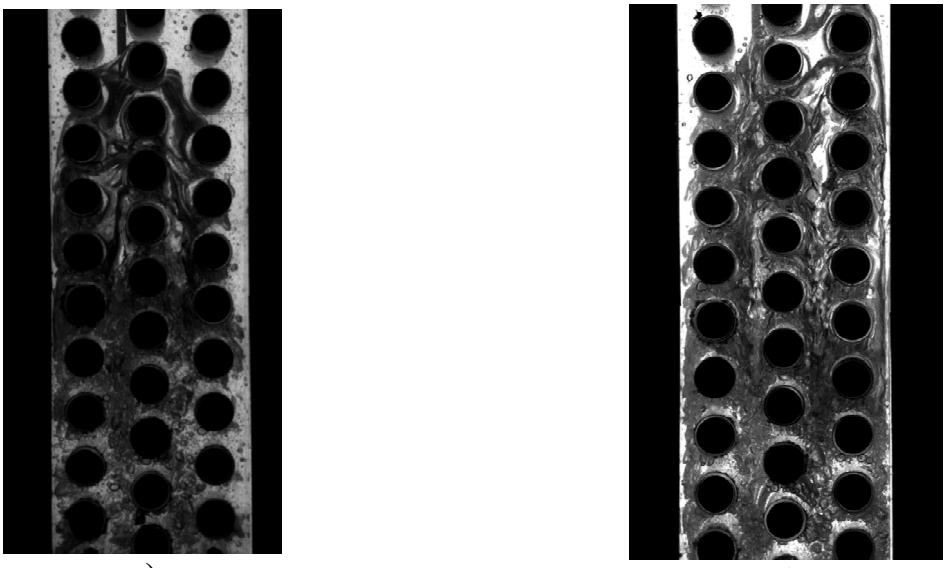
На рис. 4 приведены теневые фотографии эволюции газового пузыря при его истечении из одиночного капилляра при скорости жидкости U_L=0,3-0,7 м/с при объеме цилиндра 30 мл и давлении впрыска 7 атм.



а) *б*) *в*)

Рис. 4. Фотографии пузырей при объеме цилиндра 30 мл и давлении впрыска 7 атм при скоростях потока 0,3 м/с (а), 0,5 м/с (б), 0,7 м/с (в)

Влияние объема цилиндра на форму пузыря при скорости потока 0,5 м/с и давлении впрыска 12 атм показано на рис. 5.



а) *б*)

Рис. 5. Фотографии пузырей при скорости потока 0,5 м/с
и давлении впрыска 12 атм при объемах цилиндра 30 мл (а), 70 мл (б)

Обсуждение

Экспериментальные исследования динамики газожидкостных потоков в каналах с горизонтальным пучком труб выявили следующие закономерности. При инжекции газовой фазы в жидкостной поток наблюдается существенное образование нестационарной картины.

Анализ полученных визуализационных данных позволяет установить ключевые этапы жизненного цикла газовых пузырей: начальное формирование пузыря на капилляре, его последующий отрыв и динамические изменение формы при движении в потоке.

Примечательно, что объем инжектируемого газа, в отличие от давления впрыска, не оказывает существенного влияния на максимальные значения динамического давления в системе. Во всех проведенных экспериментах наблюдалось устойчивое восходящее движение крупных газовых пузырей. При этом кинематические характеристики пузырей демонстрировали прямую зависимость от давления впрыска – с его увеличением отмечался рост скорости движения газовых включений.

Заключение

1. Проведено исследование влияния скорости нисходящего потока, давления впрыска, объема цилиндра на динамику газового пузыря в нисходящем течении в канале с горизонтальным пучком труб.

2. Показано, что увеличение давления впрыска приводит к увеличению длины пузыря.

3. Выяснено, что изменение скорости нисходящего потока оказывает влияние на структуру течения, вызывая отрывы пузырей и их «зависание» вблизи трубок с последующим срывом.

4. Выяснено, что изменение объема цилиндра не оказывает значительного влияния на динамику всплытия газового пузыря.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles. – New York: Academic Press, 1978. – 380 p.

2. Tomiyama A. [et al.] Drag and lift forces on a single bubble in a shear flow // Physics of Fluids. – 2002. – Vol. 14, № 2. – P. 69–79.

3. Bhaga D., Weber M.E. Bubbles in viscous liquids // Journal of Fluid Mechanics. – 1981. – Vol. 105. – P. 61–85.

4. Mougin G., Magnaudet J. Path instability of a rising bubble // Physical Review Letters. –

5. Zun I., Kljenak I. Bubble behavior in a horizontal tube bundle // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1995. – Vol. 10, № 4. – P. 560–568.

6. Kandlikar S.G. Heat transfer mechanisms in bubbly flow // ASME Journal of Heat Transfer. – 2012. – Vol. 134, № 3. – P. 034001.

© И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-192-196

С. М. Волков[1]✉, Н. А. Гуляев[1], Д. Е. Легостаев[1], К. А. Филиппский[1]

Динамика газовых пузырей в кольцевом канале малого сечения

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: volkov.semyon.m@gmail.com

Аннотация. Исследование всплытия газовых пузырьков в кольцевом канале малого сечения представляет значительный интерес для моделирования двухфазных течений в активной зоне ядерных реакторов, особенно в аварийных режимах. В данной работе экспериментально изучено поведение пузырьков в кольцевом канале (внешний диаметр – 20 мм, внутренний – 11 мм), заполненном дистиллированной водой. Инжекция газа осуществлялась через капилляры разного диаметра (0,2 и 0,4 мм), расположенные в нижней части центральной трубы. Для минимизации оптических искажений использовался иммерсионный блок, а регистрация движения пузырьков проводилась методом теневой высокоскоростной съемки с применением системы зеркал, позволяющей фиксировать две проекции на одном изображении. Обработка данных выполнялась с помощью алгоритма на Python, включающего бинаризацию, сегментацию и расчет координат, скорости и эквивалентного диаметра пузырьков. Установлено, что увеличение диаметра капилляра приводит к росту отрывного и среднего диаметров пузырьков (4,1 мм против 3,3 мм), а также снижает частоту их колебаний при всплытии. Полученные результаты могут быть использованы для верификации расчетных моделей двухфазных потоков в сложных геометрических конфигурациях.

Ключевые слова: кольцевой канал, двухфазный поток, всплытие пузырьков, теневая визуализация, оптическая диагностика, обработка изображений

S. M. Volkov[1]✉, N. A. Gulyaev[1], D. E. Legostaev[1], K. A. Filipskiy[1]

Dynamics of gas bubbles in an annular channel of small cross section

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: volkov.semyon.m@gmail.com

Abstract. The study of the ascent of gas bubbles in an annular channel of small cross-section is of considerable interest for modeling two-phase flows in the core of nuclear reactors, especially in emergency modes. In this paper, the behavior of bubbles in an annular channel (outer diameter – 20 mm, inner – 11 mm) filled with distilled water is experimentally studied. The gas was injected through capillaries of different diameters (0.2 and 0.4 mm) located in the lower part of the central pipe. To minimize optical distortion, an immersion unit was used, and the bubble movement was recorded using high-speed shadow photography using a mirror system that allows two projections to be fixed on one image.Data processing was performed using a Python algorithm that includes binarization, segmentation, and calculation of coordinates, velocity, and equivalent bubble diameter. It was found that an increase in the capillary diameter leads to an increase in the tear-off and average bubble diameters (4.1 mm versus 3.3 mm), and also reduces the frequency of their oscillations during ascent. The results obtained can be used to verify computational models of two-phase flows in complex geometric configurations.

Keywords: annular channel, two-phase flow, bubble popping, shadow visualization, optical diagnostics, image processing

Введение

Кольцевые каналы являются неотъемлемой частью различных технических устройств как в промышленности, так и в энергетической отрасли [1,2]. В частности, кольцевой канал малого сечения может выступать в качестве первого приближения моделирования обтекания пучка стержней – тепловыделяющих элементов в активной зоне реактора атомной электростанции. Исследования однофазных течений в кольцевых каналах широко представлены большим количеством работ. Течения двухфазных потоков напротив – изучены недостаточно. При этом исследование двухфазного потока в активной зоне реакторов типа ВВР особенно актуально в контексте моделирования аварийной ситуации. Особый интерес представляет изучение процесса инжекции пузырька с последующим всплытием. В данной работе проведено исследование всплытия пузырьков в кольцевом канале с внешним диаметром 20 мм и внутренним диаметром 11 мм.

Методы и материалы

Экспериментальная установка представляет собой непосредственно кольцевой канал, заполненный дистиллированной водой, в котором, при помощи капилляров разного диаметра, осуществляется инжекция газа (капилляр располагается внизу центральной трубки кольцевого канала) (рис. 1). Данный кольцевой канал помещен в иммерсионный блок с целью нивелирования искажения изображения вследствие преломления световых лучей на поверхности трубки. В качестве метода исследования использовалась теневая высокоскоростная съемка (использована видеокамера JET-19) с последующей компьютерной обработкой изображений. С целью восстановления трехмерной траектории движения пузырьков газа осуществлялась регистрации двух проекций пузырьков на одном изображении, при помощи оптической системы зеркал. Данный аспект позволяет провести измерения, используя лишь одну камеру вместо двух, и избавляет экспериментатора от необходимости дополнительной синхронизации изображений.

Автоматическая обработка изображений осуществлялась с помощью алгоритма на языке Python. Алгоритм обработки выглядел следующим образом. Сначала происходило чтение изображения, затем выбор порога яркости с последующей бинаризацией, после чего уже на бинарных изображениях происходила сегментация исследуемых объектов – пузырьков газа. Затем осуществлялось вычисление координат центров пузырьков, и как итог обработки – вычисление локальной скорости и эквивалентного диаметра. Выбор порога яркости при этом играет ключевую роль в определении границ пузырька. На рис. 2 приведена диаграмма яркости изображения одиночного пузырька.

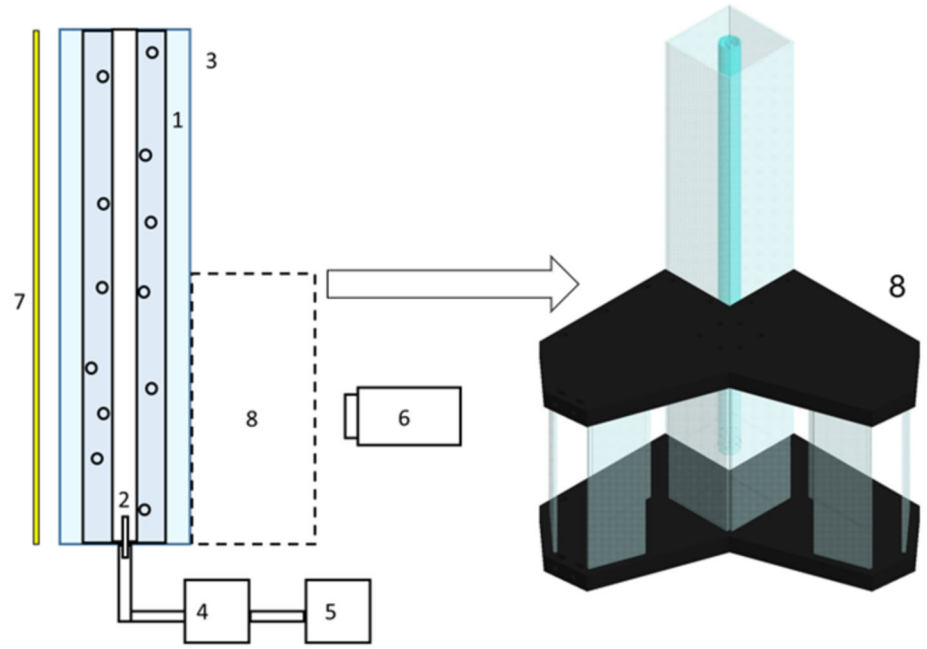


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 – рабочий участок; 2 – капилляр; 3 – иммерсионный блок; 4 – расходомер; 5 – компрессор; 6 – видеокамера; 7 – LED-матрица; 8 – оптическая система зеркал

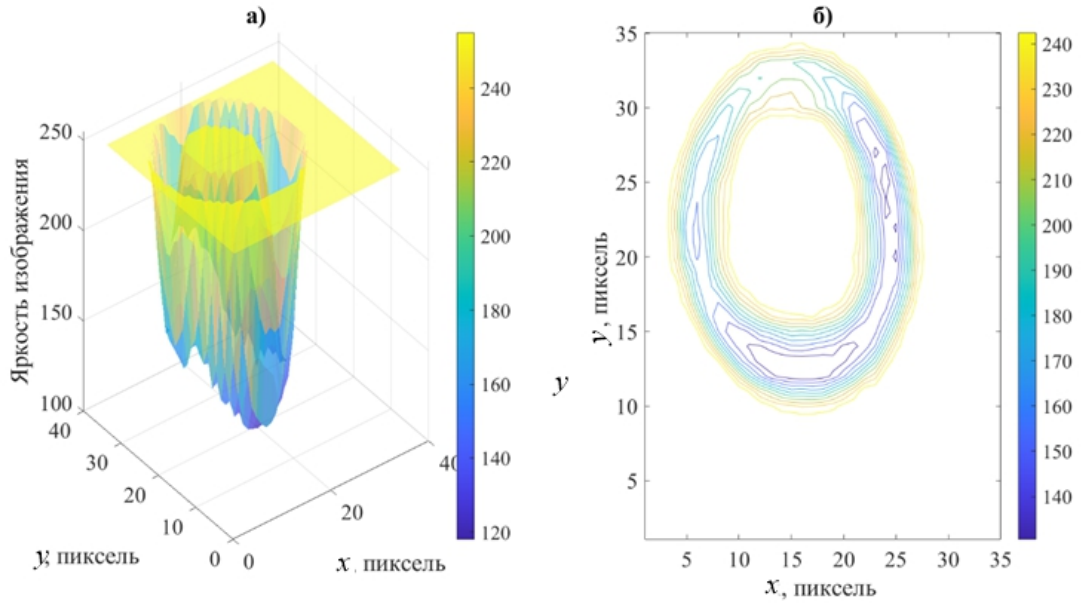


Рис. 2. Отработка изображений

Результаты

Измерения проводились при двух различных значениях относительного газосодержания β_1=0,05 и β_2=0,07 и двух значениях диаметра капилляра d_1=0,2 мм и d_2=0,4 мм. На рис. 3 представлены теневые изображения пузырьков газа при инжекции из капилляров разного диаметра.

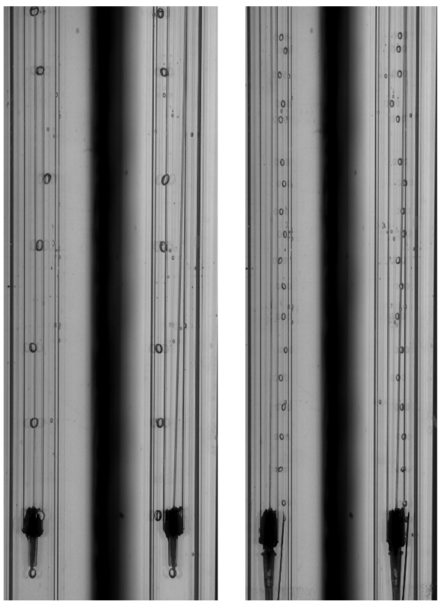


Рис. 3. Теневые изображения всплытия пузырьков: слева – d_2=0,4 мм, справа – d_1=0,2 мм, β_1=0,05

На рис. 4 представлены траектории всплытия одиночного пузырька при инжекции из капилляров разного диаметра.

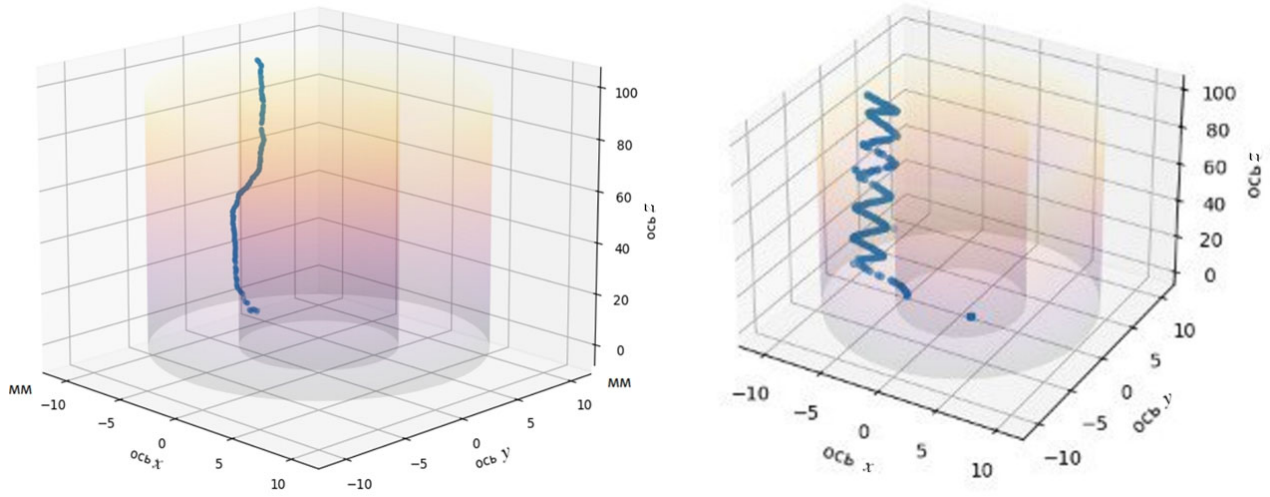


Рис. 4. Траектории всплытия одиночного пузырька: слева – d_2=0,4 мм, справа – d_1=0,2 мм, β_1=0,05

Обсуждение

При увеличении диаметра капилляра значительным образом увеличивается как отрывной диаметр пузырька, так и средний диаметр пузырьков по выборке изображений, зафиксированных за 2 минуты. Средние диаметры для двух исследуемых случаев равны, соответственно, D_1 =4,1 мм, D_2 = 3,3 мм. Помимо этого, при инжекции с более мелким капилляром наблюдается большая частота колебаний всплывающего пузырька по длине канала.

Заключение

Разработана оптическая система зеркал, позволяющая регистрировать две перпендикулярные проекции исследуемого объекта на одном изображении. Полученные в результате выполненной работы данные могут служить базой для верификации расчетных кодов, описывающих движение двухфазных потоков в условиях сложной геометрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / СПб.: Политехника, 2004.

2. Акатов А. А., Коряковский Ю. С. Будущее ядерной энергетики. Реакторы на быстрых нейтронах. Информационные центры по атомной энергии. Москва, 2012. – 36 с.

© С. М. Волков, Н. А. Гуляев, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-197-202

П. Д. Лобанов[1]✉, А. И. Светоносов[1], Н.А. Прибатурин[1]

Визуализация движения пузырей в жидком металле

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований структуры двухфазной среды жидкий металл – газ в вертикальных каналах в зависимости от расхода газовой фазы и диаметра каналов. В качестве жидкой среды использовался свинцово – висмутовый расплав, находящийся при температуре 160 ºС. В качестве газовой фазы использовался аргон. Получены данные по форме газовых пузырьков, временному изменению газосодержания в каналах, особенностям снарядного течения газовой фазы в расплаве металла.

Ключевые слова: газовый пузырь, двухфазный поток, жидкий металл

P. D. Lobanov[1]✉, A. I. Svetonosov[1], N. A. Pribaturin[1]

Visualization of bubble motion in liquid metal

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Abstract. The paper presents the results of experimental studies on the structure of a two-phase medium (liquid metal–gas) in vertical channels, depending on the gas flow rate and channel diameter. A lead-bismuth melt at a temperature of 160°C was used as the liquid, while argon served as the gas phase. Data were obtained on the shape of gas bubbles, temporal variations in gas holdup within the channels and the characteristics of slug flow of the gas phase in the metal melt.

Keywords: gas bubble, two-phase flow, liquid metal, hydrodynamics

Введение

Экспериментальным исследованиям двухфазного газожидкостного течения посвящено довольно много работ, в которых приводятся данные о закономерностях распределения газосодержания, скоростей фаз, размеров пузырьков, режимов течения. Основная масса работ выполнена для совместного течения воды и газа. Двухфазное течение, представляющее собой смесь жидкого свинца или свинцово-висмутового расплава и газовой фазы, является важным объектом изучения при моделировании и проектировании циркуляционных контуров ядерных реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. Подобные теплоносители, обладают высокой плотностью и температурной устойчивостью. Но, в отличие от системы вода-газ, соотношение плотности газа и жидкого металла значительно ниже.

Большая разность плотностей фаз приводит к увеличению плавучести газовой фазы, и связанными с этим возможными изменениями формы, размера и эволюции пузырьков газа в жидком металле.

Исследованию двухфазного течения в жидком металле посвящен ряд работ [1-5]. В [1] приведен обзор экспериментальных исследований распределения скорости всплытия газовых включений в восходящем двухфазном потоке газ – жидкий металл в круглых трубах, прямоугольных каналах и узких зазорах, а также существующих моделей и сравнение их с экспериментальными данными для каналов различной геометрии. Представлены экспериментальные данные для потоков, в которых дисперсную фазу представлял азот, а несущую –ртуть, свинец/висмут, галлий, натрий, калий, в вертикальных, кольцевых и треугольных каналах и семи различных моделей. Совпадение моделей с экспериментальными данными было проверено, и не найдено ни одной модели, способной хорошо описать эксперимент.

Визуальное наблюдение двухфазного течения в среде жидкого металла осложнено в силу его полной непрозрачности. В работах [2,3] для преодоления этой трудности был использован метод нейтронной радиографии. С помощью такой техники было проведено наблюдение за поведением газовых пузырей, измерены газосодержание, размер и скорость всплытия пузырьков. Измерения были проведены для течения двухфазной смеси азот-свинец/висмут в прямоугольном плоском канале шириной 0,1 м, высотой 0,53 м, глубиной 20 мм при атмосферном давлении и температуре расплавленного эвтектического сплава Pb/Bi 200ºC. Эксперименты проводились в условиях покоящейся жидкости при приведенных скоростях газа до 0,3 м/с. Подача газообразного азота в расплавленный эвтектический сплав свинец-висмут осуществлялась через газовый инжектор, который представлял собой 7 капилляров из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,5 мм, установленных вдоль прямой линии на дне бассейна.

В работе [4] проведены экспериментальные исследования двухфазного потока, состоящего из свинцово- висмутового расплава с азотными пузырьками с использованием зондов проводимости и датчиков дифференциального давления в различных вертикальных трубах с внутренним диаметром 0,069 м, 0,106 м и 0,155 м и высотой более одного метра при атмосферном давлении и температуре 200 ºC.

В работе [5] с целью верификации кода моделирования аварийной ситуации жидкометаллического ядерного реактора на быстрых нейтронах SIMMER-II выполнено экспериментальное исследование восходящего двухфазного течения азот-галлий в вертикальной круглой трубе большого диаметра с внутренним диаметром 0,1 м и высотой 1,0 м при атмосферном давлении 0,1 МПа и температуре галлия до 80ºC.

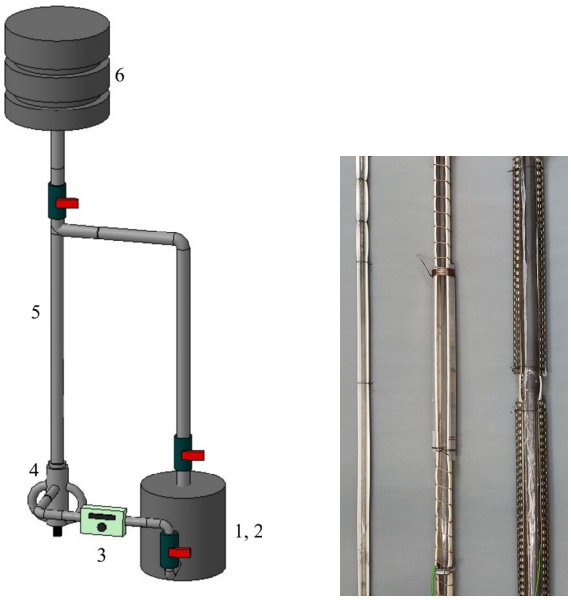
Основное внимание в ранее выполненных работах уделялось пузырьковому режиму течения с определением размеров пузырька, скорости его всплытия.

Данная работа направлена на установление изменений закономерности эволюции газовых пузырей в свинцово-висмутовом расплаве при постепенном уве-

личении расхода газа и достижении снарядного режима течения, влияния диаметра канала на этот процесс, детализацию гистограмм распределения газосодержания при пузырьковом и снарядном режимах течения.

Методы и материалы

Эксперименты проводились на гидродинамическом контуре, схема которого приведена на рис. 1. Экспериментальная установка включает в себя рабочий участок, бак с жидким металлом, переливной бак, циркуляционный насос, узел подачи газовой фазы, систему поддержания заданной температуры всех элементов стенда. Были использованы 3 цилиндрических вертикальных рабочих участка с внутренним диаметром 8, 20 и 30 мм. Температура свинцово-висмутового расплава в эксперименте составила 160°С.



а) *б*)

Рис.1. Схема двухфазного гидродинамического стенда – а) и вид рабочих участков – б): 1, 2 – основной бак и насос; 3 – расходомер; 4 – входной коллектор; 5 – рабочий участок; 6 – расширительный бак

Основное внимание в данной работе было уделено созданию условий для наблюдения и фиксации режимов течения двухфазной среды. Поэтому рабочие участки были изготовлены из кварцевого стекла и имели высоту 1 м. Ранее [6] было показано, что использование каналов из кварцевого стекла позволяет добиться «прозрачности» двухфазного течения в жидком металле. Использование канала из кварцевого стекла позволяет визуально контролировать не только режим течения, но и наблюдать эволюцию отдельных пузырьков газа в жидком металле. Недавно подобный метод независимо был использован для изучения двухфазного потока газ-галинстан [7]. Рабочие участки монтировались в гидродина-

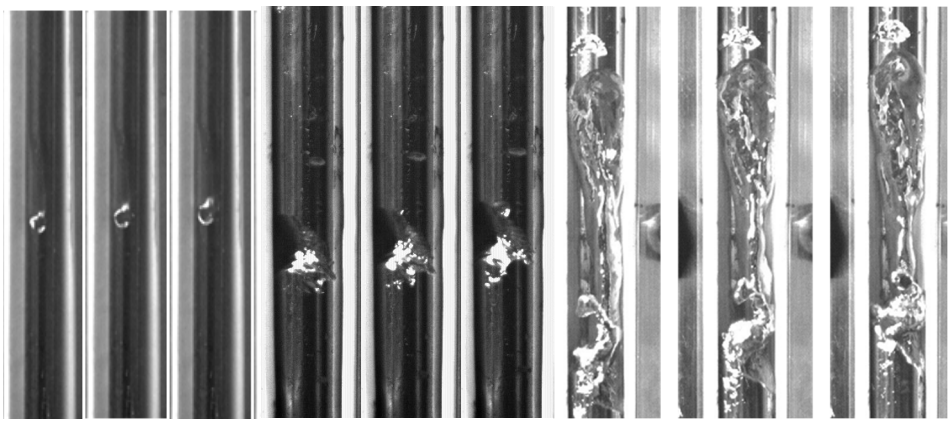
мический контур, используя унифицированные узлы крепления. Это позволяло легко менять рабочие участки в экспериментальном стенде.

Во избежание «захолаживания» свинцового-висмутового расплава в контуре, все его конструктивные элементы нагревались до температуры расплава с последующим поддержанием с целью обеспечения ее однородности. Для этого использовалась 16 канальная система, состоящая из электрических спиральных нагревателей, узла подвода и регулировки электрической мощности, термопар и измерителей-контроллеров температуры ТРМ-138. Кварцевые рабочие участки были оснащены индивидуальными нагревателями, которые подключались к терморегуляторам ТРМ-138 и с их помощью поддерживали необходимую температуру. Измерение температур жидкого металла и элементов контура производилось с помощью термопар хромель-алюмель (тип К). Для нагрева рабочих участков применялась нагревательная лента ЭНГЛ-1.

Результаты

Результаты измерений по определению эволюции газовых пузырей были проведены при неподвижной жидкой фазе. Эволюция газовых пузырей в жидком металле при постепенном увеличении расхода газа от минимального до максимально возможного приведена на рис. 2 (а-в).

При минимальном расходе газа в жидком металле формируются маленькие пузырьки газа с формой, близкой к сфероидальной. Фотографии такого пузыря в расплаве жидкого металла в трубе диаметром 8 мм приведены на рис. 2 а. По мере движения пузырька на межфазной границе развивается неустойчивость, пузырек теряет свою сферическую симметричность, но сохраняется как целый объект без распада на кластер более малых пузырьков. С увеличением расхода газа неустойчивость межфазной границы пузырька с жидким металлом прогрессирует, пузырек начинает не только изменять форму при своем движении, но и меняет траекторию движения. Постепенно повышение расхода газа в канале приводит к образованию пузырей большего размера, которые принимают форму полусферического сегмента, заполняющего поперечное сечение канала (см рис. 2 б). Межфазная граница газового пузырька в жидком металле подвержена нестабильности: на ней возникают и развиваются возмущения, которые по мере своего роста и взаимодействия с окружающей жидкостью значительно искажают исходную форму пузырька. Одним из ключевых факторов, способствующих такой неустойчивости, является слабое смачивание поверхности стенки канала жидким металлом.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Эллиптический газовый пузырек *а*), полусферический газовый пузырь *б*) и газовый снаряд *в*), всплывающие в трубе со свинцово – висмутовым расплавом, Т = 160°С, время между кадрами 4,2 мс.

Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к формированию в каналах с жидким металлом газовых снарядов. Тем не менее, форма газовых пузырей в жидком металле заметно отличается от «классической» формы пузыря Тейлора, наблюдаемой в круглых каналах при двухфазных течениях [8]. На рис. 2в представлена типичная последовательность изменений формы газового пузыря (газового снаряда), всплывающего в расплаве жидкого металла. Экспериментальные данные показали, что, в отличие от классического случая, для жидкометаллической среды не формируется устойчивая жидкая пленка между поверхностью пузыря и стенкой канала. Вместо этого вблизи стенки образуется неустойчивая область, в которой постоянно развиваются возмущения, приводящие к флуктуациям формы и положения пузыря. В отличие от хорошо изученного снарядного режима течения в системе вода- газ, эволюция газового снаряда в жидком металле нестабильна, что выражается в виде хаотического колебания границы раздела газ-жидкость, и нерегулярности периодов формирования и следования снарядов в жидкости. Форма газового снаряда постоянно изменяется, их эволюция напоминает «винтообразное» движение. Подобное поведение газового снаряда было зафиксировано и в работе [9], где для регистрации был применен рентгенографический метод. Отметим также, что аналогичная нестационарность межфазной границы снаряда наблюдалась для кольцевого канала с водяным теплоносителем [11].

Заключение

Определены закономерности эволюции газовой фазы в неподвижном свинцово-висмутовом теплоносителе, находящегося при температуре 160°С в вертикальных каналах различного диаметра (8, 20, 30 мм) в зависимости от расхода газа. Для всех каналов при постепенном увеличении расхода газовой фазы зафиксирован переход от пузырькового к снарядному режиму течения. Получены

данные по изменению формы пузырьков и газовых снарядов, закономерностям эволюции газосодержания. Показано, что классического снарядного течения с равномерной пленкой жидкости на цилиндрической части газового снаряда в системе жидкий металл – газ не возникает, форма газового снаряда нестабильна. Снарядный режим течения всегда сопровождается развитием сильной неустойчивости на границе газовой полости жидкого металла, приводящей к случайному значению межфазной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiuzhong Shen, Takashi Hibiki. Distribution parameter and drift velocity for upward gas-liquid metal two-phase flow, Applied Thermal Engineering, 2021 T. 184, pp. 1 – 22.

2. T. Hibiki, Y. Saito, K. Mishima, Y. Tobita, K. Konishi, M. Matsubayashi, Study on flow characteristics in gas-molten metal mixture pool, Nucl. Eng. Des. 196 (2000) 233–245.

3. K. Mishima, T. Hibiki, Y. Saito, H. Nishihara, Y. Tobita, K. Konishi, M. Matsubayashi, Visualization and measurement of gas-liquid metal two-phase flow with large density difference using thermal neutrons as microscopic probes, Nucl. Inst. Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerat. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 424 (1999) 229 – 234.

4. Y. Nishi, I. Kinoshita, S. Nishimura, Experimental study on the gas lift pump in lead-bismuth eutectic, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen 70 (2004) 715 – 722.

5. M. Saito, T. Sawada, Y. Teraoka, A. Netu, Dispersion characteristics of gas-liquid two-phase pools, in: Proceedings of the 6th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-6), San Diego, USA, May 10–14, 1998.

6. Mosunova N. A. at al. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HY-DRA-IBRAE/LM and some validation results // Nuclear Engineering and Design. 2020. T. 359. С. 110463.

7. Josh Rosettani, Wael Ahmeda, Philip Geddis, Lijun Wu, Bruce Clements Experimental and numerical investigation of gas-liquid metal two-phase flow pumping // International Journal of Thermofluids 10 (2021) 100092.

8. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. – 436 с.

9. Saito, Y., Mishima, K., Tobita, Y., Suzuki, T., Matsubayashi, M., 2005. Measurements of liquid–metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe. Exp. Therm. Fluid Sci. 29, 323–330.

10. Усов, Э.В., Лобанов, П.Д., Кутлиметов, А.Э., Кудашов, И.Г., Чухно, В.И., Lezhnin, S.I., Pribaturin, N.A., Kashinsky, O.N., Svetonosov, A.I., Mosunova, N.A., 2018. Экспериментальное моделирование гидродинамики и теплообмена при пузырьковом и снарядном режимах течения газа в тяжелом жидком металле. Теплоэнергетика 65, 82–87.

11. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С. Трение на стенке при движении газовых снарядов в кольцевом канале. Теплофизика и аэромеханика, 2021, № 2, с. 265–269.

© П. Д. Лобанов, А. И. Светоносов, Н. А. Прибатурин, 2025

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-203-207

Н. А. Гуляев[1], А. И. Светоносов[1], И. А. Евдокименко[1]✉, Д. Е. Легостаев[1], К. А. Филиппский[1]

Экспериментальное исследование движения пузырей в вертикальном пучке стержней

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование динамики газового пузыря из цилиндра объемом 70 мл в вертикальном пучке стержней. Методом высокоскоростной видеосъемки (500 кадр/с) были изучены процессы формирования, подъема и дробления пузыря в межстержневом пространстве. Установлено, что пузырь приобретает сигарообразную форму и подвергается дроблению на участке 150 мм. Выявлены ключевые режимы взаимодействия с пучком стержней. Полученные данные важны для верификации CFD-моделей теплообменного оборудования.

Ключевые слова: газовый пузырь, пучок стержней, двухфазный поток, теневая съемка, гидродинамика

N. A. Gulyaev[1], A. I. Svetonosov[1], I. A. Evdokimenko[1]✉, D. E. Legostaev[1], K. A. Filipskiy[1]

Experimental study of bubble motion in a vertical beam of rods

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Abstract. An experimental study of the dynamics of a gas bubble from a 70-mL cylinder in a vertical beam of rods has been carried out. The processes of formation, rise and crushing of the bubble in the interrod space have been studied by the method of high-speed video shooting (500 frames/second). It was found that the bubble acquires a cigar-like shape and undergoes crushing at the 150 mm section. The key modes of interaction with the rod bundle are identified. The obtained data are important for verification of CFD models of heat exchange equipment.

Keywords: gas bubble, rod bundle, two-phase flow, shadow imaging, hydrodynamics

Введение

Повышение эффективности и безопасности работы ядерных реакторов требует постоянного совершенствования расчетных кодов, описывающих теплогидравлические характеристики таких реакторов. Разработка и верификация расчетных кодов невозможны без экспериментальных данных о структуре течения в конструктивных элементах реакторов. Основным элементом активной зоны реактора является тепловыделяющая сборка, состоящая из пучка стержней – тепловыделяющих элементов. Преобладающим режимом течения в тепловыделяющей сборке является двухфазное (парожидкостное) течение. Структура двухфазного течения в каналах простой геометрии интенсивно изучается как теоретиче-

ски, так и экспериментально. Количество экспериментальных работ по структуре двухфазного течения в элементах тепловыделяющих сборок ограничено.

В последние годы проведен ряд экспериментальных работ, посвященных изучению движения пузырей в пучках стержней с использованием современных методов визуализации, таких как высокоскоростная видеосъемка, PIV (Particle Image Velocimetry) и ЛДА (лазерная допплеровская анемометрия). Эти исследования позволили выявить ключевые закономерности, такие как влияние межстержневого зазора на распределение пузырей по размерам [1, 2], особенности турбулентного взаимодействия жидкости и газовой фазы [3], а также зависимость режимов течения от расхода жидкости и газосодержания [4, 5]. Однако, несмотря на значительный прогресс, остаются не до конца изученными вопросы, связанные с коалесценцией и дроблением пузырей в условиях ограниченных каналов, а также влияние вибрации стержней на двухфазную динамику. Кроме того, большинство существующих корреляций для расчета скорости подъема пузырей разработаны для простых геометрий и требуют уточнения для пучков стержней [6, 7].

Целью данной работы является экспериментальное исследование распространения газовой фазы в поперечном сечении многостержневой сборки при внезапной инжекции газа в стационарную жидкость. Эксперименты проведены в цилиндрическом канале, в который были установлены N=7 – 85 вертикальных стержней с диаметром 10 мм.

Методы и материалы

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

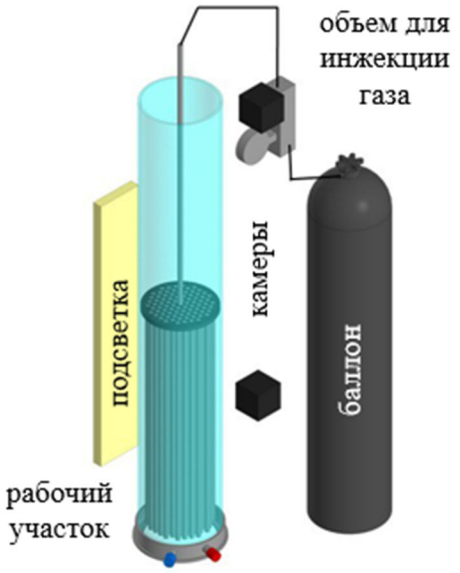
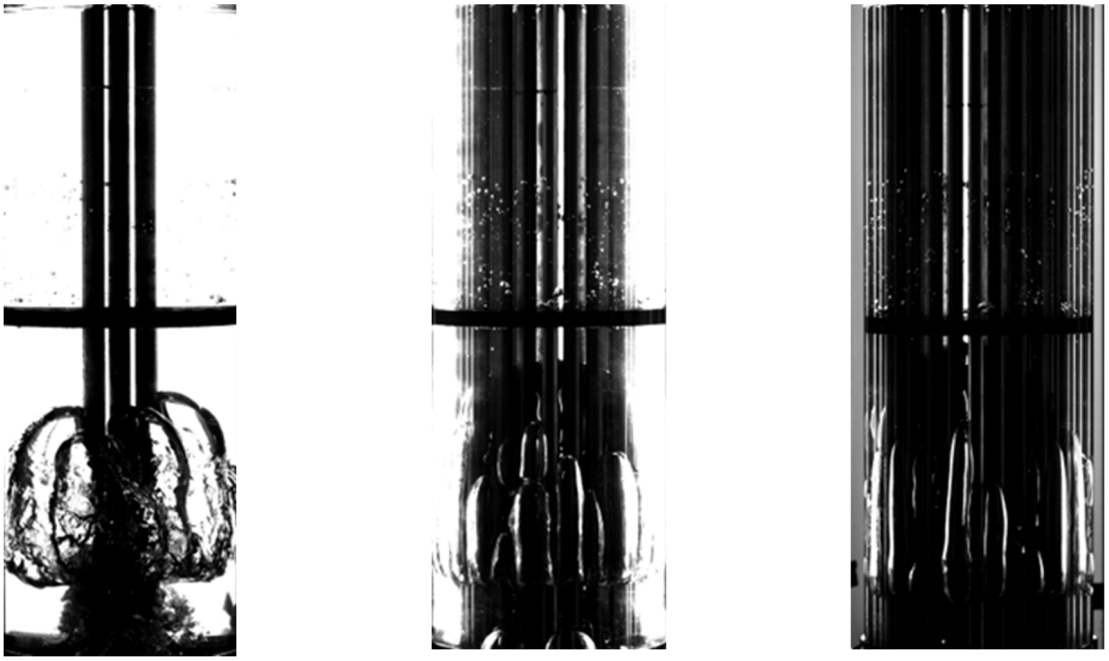


Рис. 1. Экспериментальная установка

Стенд представляет собой оргстеклянный цилиндр диаметром 150 мм и высотой 1000 мм, который был заполнен рабочей жидкостью (дистиллированная вода). В цилиндр устанавливались металлические стержни (d=10 мм) в количестве от 7 до 85 штук и закреплялись в канале при помощи фиксирующих колец. В центральный стержень инжектировался газ с различным давлением впрыска. Истечение газового пузыря происходило через отверстие в основании стержня. При помощи оптических зеркал, источника света и цифровой камеры проводилась теневая съемка динамики развития газового пузыря.

Результаты

На рис. 2 и 3 приведены фотографии эволюции газового пузыря при его внезапной инжекции при установке 7, 37 и 61 стержней.

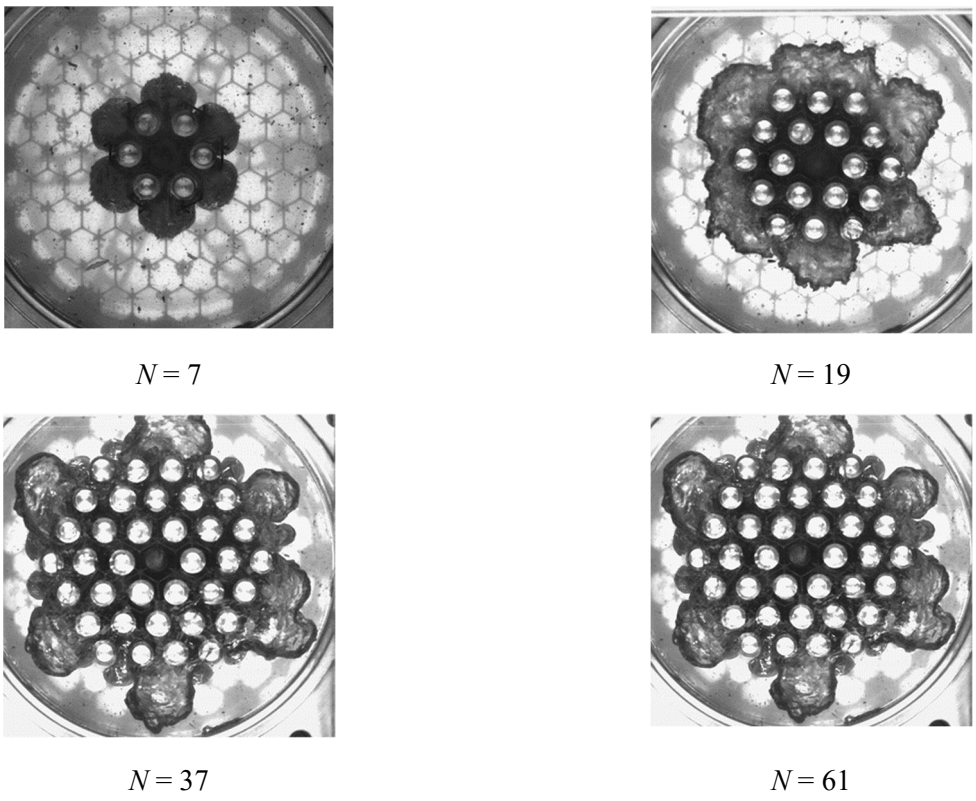


$N = 7$ $N = 37$ $N = 61$

Рис. 2. Фронтальный вид

Обсуждение

На начальной стадии формирования пузыря наблюдалась следующая последовательность процессов. В течение первых 50-100 мс происходило формирование первичного газового ядра у инжекционного отверстия. По достижении критического объема начиналась деформация пузыря с заполнением межстержневого пространства. Через 200-300 мс после начала инжекции основной объем газа (≈70 мл) принимал вытянутую форму. На участке высотой 150 мм происходило дробление пузыря. Также наблюдалось разделение потока газа на несколько параллельных каналов.



N = 7 *N* = 19

N = 37 *N* = 61

Рис. 3. Вид сверху

Были выяснено, что обтекание стержней происходит с периодическим слиянием и разделением пузырей. Особый интерес представляет наблюдаемый эффект организации газового потока, когда после первоначального распределения по нескольким каналам происходило спонтанное распределение газа по различным каналам. Это явление, по-видимому, связано с неравномерностью гидродинамического сопротивления в различных направлениях пучка стержней.

Заключение

Было проведено экспериментальное исследование движения газовой фазы при внезапном впрыске в вертикальный пучок стержней, которое позволило выявить особенности возникновения и динамики дисперсных структур в сборках вертикальных стержней. Полученные в результате выполненной работы данные могут служить базой для верификации расчетных теплогидравлических кодов, разрабатываемых в рамках выполнения программы работ по расчетно-экспериментальному обоснованию тепловыделяющих сборок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Julia J.E., Ozar B., Brooks C.S. Experimental investigation of bubble behavior in vertical rod bundles under low flow conditions // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Vol. 330. – P. 340–352.

2. Shen X., Mishima K., Nakamura H. Bubble size and velocity measurements in vertical rod bundles under low pressure conditions // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – Vol. 74. – P. 27–36.

3. Brooks C.S., Kim S., Hibiki T. PIV measurements of turbulent flow structures in a vertical rod bundle with two-phase flow // International Journal of Multiphase Flow. – 2019. – Vol. 116. – P. 103–123.

4. Kim S., Paranjape S., Ishii M. High-speed visualization of bubble coalescence in vertical rod bundle geometry // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Vol. 360. – Art. 110678.

5. Paranjape S.S., Kim S., Kelly J.M. Flow regime identification in vertical rod bundles under high pressure conditions // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Vol. 312. – P. 45–58.

6. Ylönen M., Puustinen M., Räsänen A. Experimental study on bubble clustering in vertical rod bundles under varying void fraction conditions // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 128. – P. 12–25.

7. Zboray R., Prasser H.-M., Damsohn M. Experimental investigation of bubble rise velocities in complex geometries // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2015. – Vol. 53. – P. 156–167.

8. Manera A., Bousbia-Salah A., Petrov V. Validation of CFD models against high-resolution bubble tracking experiments in rod bundles // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Vol. 374. – Art. 111234.

© Н. А. Гуляев, А. И. Светоносов, И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025

УДК 681.785.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-208-213

А. А. Сырбаков[1,2]✉, И. А. Зарубин[1,2], А. А. Дзюба[2], С. В. Додонов[2]

Согласование параметров эшелле-решетки с размерами фотоприемной матрицы

[1] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aleksei.syrbakov@yandex.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается актуальность разработки отечественного эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией для проведения анализа методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Основное внимание уделяется преимуществам эшелле-спектрометров, таким как высокое разрешение, широкий спектральный диапазон, высокая светосила и компактные размеры. Определены ключевые параметры спектрометров для проведения анализа методом ИСП-АЭС, такие как спектральный диапазон и разрешающая способность. Проведен анализ отечественных дифракционных эшелле-решеток из каталога Государственного оптического института (ГОИ) и Государственного института прикладной оптики (ГИПО), которые могут быть применены для создания спектрометра. Представлена таблица с характеристиками эшелле-решеток и оптической системы, обеспечивающих необходимые параметры. На основе проведенного анализа выбраны оптимальные эшелле-решетки для разработки отечественного спектрометра.

Ключевые слова: эшелле-решетка, спектрометр со скрещенной дисперсией, ИСП-АЭС

A. A. Syrbakov[1,2]✉, I. A. Zarubin[1,2], A. A. Dzuba[2], S. V. Dodonov[2]

Agreement of parameters of the echelle-grating with dimensions of photodetector array

[1] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aleksei.syrbakov@yandex.ru

Abstract. In this paper we consider the relevance of the development of a domestic crossed-dispersion echelle spectrometer for analysis by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The main attention is paid to the advantages of echelle spectrometers, such as high resolution, wide spectral range, high light transmission and compact size. Key parameters of spectrometers for ICP-AES analysis, such as spectral range and resolution, are determined. The analysis of domestic diffraction echelle grating from the catalog of the State Optical Institute and the State Institute of Applied Optics, which can be applied to create a spectrometer, has been conducted. The table with the characteristics of echelle-gratings and optical system providing the necessary parameters is presented. On the basis of the analysis, the optimal echelle-gratings for the development of a domestic spectrometer are selected.

Keywords: echelle-grating, crossed-dispersion spectrometer, ICP-AES

Введение

В настоящее время спектрометрия является одним из наиболее востребованных методов для идентификации элементного состава и количественного опреде-

ления концентраций в исследуемых пробах [1, 2]. Атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) получила широкое распространение по всему миру и продолжает развиваться, благодаря возможности одновременного определения большого числа элементов, низким пределам обнаружения и высокой стабильности измерений.

Развитие спектрометрии в значительной степени определяется улучшением характеристик спектрального оборудования [3], включая спектральный диапазон, разрешающую способность, светосилу, и стабильность параметров. В этом контексте эшелле-спектрометры со скрещенной дисперсией демонстрируют значительные преимущества по сравнению с традиционными системами, работающими в одном дифракционном порядке, такими как схемы Черни-Тернера [4–6], Эберта-Фасти [7], Пашена-Рунге [8–10] и т.д.

Указанные характеристики в эшелле-спектрометрах со скрещенной дисперсией являются оптимальными при использовании таких приборов в элементном спектральном анализе [11, 12]. Однако, производство коммерческих эшелле-спектрометров для проведения атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой осуществляется иностранными компаниями, что приводит к затруднениям в поставке данного оборудования на территорию Российской Федерации. В связи с этим возникает необходимость разработки отечественных аналогов в рамках программы импортозамещения для удовлетворения потребностей внутреннего рынка.

При этом количество доступных эшелле-решеток в Российской Федерации ограничено каталогами Государственного оптического института (ГОИ) и Государственного института прикладной оптики (ГИПО), производящих дифракционные оптические элементы. Это позволяет определить решетки, пригодные для изготовления эшелле-спектрометра, соответствующего требованиям метода ИСП-АЭС.

Теоретическая часть

Рассмотрим особенности дифракции на эшелле-решетке. Соотношение падающих и дифрагированных лучей задается уравнением плоской отражательной решетки:

$$\sin\varphi+\sin\varphi'=k\lambda N, \tag{1}$$

где φ – угол падения лучей на решетку; φ’ – угол дифрагированного луча; λ – длина волны; N – частота штрихов; k – дифракционный порядок.

В случае эшелле-решетки дифракционная эффективность максимальна, когда падающий и дифрагированный лучи удовлетворяют условию зеркального отражения:

$$\varphi+\varphi'=2\gamma, \tag{2}$$

где γ – угол блеска.

Эшелле-решетка характеризуется применением в высоких дифракционных порядках, что обеспечивает высокую угловую дисперсию. Основным параметром таких решеток является угол блеска γ, под которым устанавливается решетка (режим автоколлимации). Луч, зеркально отраженный от поверхности решетки под этим углом, обладает максимальной дифракционной эффективностью. Длина волны, соответствующая этому углу, называется длиной волны блеска.

Дифракционные порядки ограничены свободным спектральным диапазоном [13], в пределах которого дифракционная эффективность составляет не менее 40%. Граничные длины волн определяются следующим уравнением:

$$\lambda = \frac{\lambda_{1,0}}{k \pm 0{,}5}, \tag{3}$$

где $\lambda_{1,0}$ – длина волны блеска 1-го дифракционного порядка.

Распределение дифракционной эффективности носит периодический характер (рис. 1) и описывается формулой [14]:

$$\Phi_m(\lambda) = \left[\frac{\sin \pi \left(k - \frac{\lambda_{1,0}}{\lambda} \right)}{\pi \left(k - \frac{\lambda_{1,0}}{\lambda} \right)} \right]^2. \tag{4}$$

Разрешающая способность [15], характеризующая способность спектрального прибора различать две близкие спектральные линии, задается формулой:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \tag{5}$$

где $\Delta\lambda$ – спектральное разрешение прибора на длине волны λ.

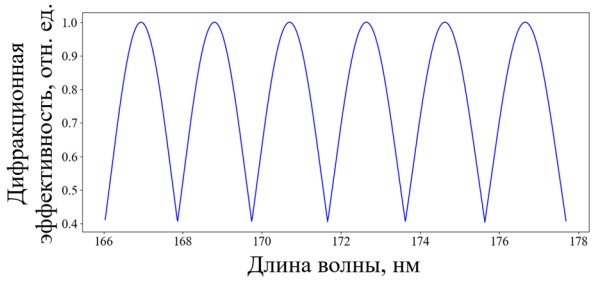


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности
от длины волны для ряда дифракционных порядков (87-90)

Результаты

На российском рынке изготовление коммерчески доступных дифракционных эшелле-решеток осуществляется в Государственном оптическом институте (ГОИ) и Государственном институте прикладной оптики (ГИПО). Ассортимент доступных решеток ограничен, что позволяет провести детальный анализ их применимости для разработки спектрометров, предназначенных для проведения анализа методом атомно-эмиссионного спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС).

Для реализации метода ИСП-АЭС спектрометр должен обладать следующими характеристиками [3, 15]:

1) спектральный диапазон от 167 до 780 нм;
2) разрешающая способность R~30000.

На основании наиболее распространенных параметров фотоприемных матриц [14], используемых в эшелле-спектрометрах, была определена необходимая линейная дисперсия для обеспечения заданного разрешения в 30000. Размер фотоячейки 27 мкм с количеством пикселей 1024×1024. В качестве щели используется отверстие с диаметром 54 мкм. В табл. 1 представлено соотношение параметров эшелле-решетки, размера детектора, охватывающего весь спектр по высоте, и фокусного расстояния спектрометра с разрешением 30000.

Обсуждение

На основании анализа табл. 1 можно сделать вывод о возможности использования отечественных эшелле-решеток для разработки спектрометра со скрещенной дисперсией, оснащенного фотоприемной матрицей с наиболее распространенными параметрами.

При применении решетки №1 весь регистрируемый спектр будет непрерывным, однако расстояние между 60-м и 61-м дифракционными порядками при использовании призмы из фторида кальция составит 37 мкм. Это приведет к наложению дифракционных порядков, аналогично ситуации при использовании решеток №2 и №6.

Таблица 1

Параметры эшелле-решеток и оптической системы спектрометра с разрешающей способностью R = 30000

№	Параметры эшелле-решетки		Фокусное расстояние, мм	Количество диф. порядков (167-780 нм)	Высота детектора, мм	Количество пикселей детектора по высоте
	Частота штрихов, $мм^{-1}$	Угол блеска, градусы				
1	37,5	63,5	403,85	226 (61-286)	26,61	986
2	50	66	360,63	173 (47-219)	34,68	1284
3	75	64,2	391,57	114 (31-144)	52,79	1955

Окончание табл. 1

4	150	60	467,66	56 (15-70)	110,52	4094
5	94,7	46	782,21	72 (19-91)	85,46	3165
6	25	62,5	421,65	335 (91-425)	17,82	660
7	100	71	278,91	91 (24-114)	73,29	2714
8	79	63	412,71	107 (29-135)	56,38	2089
9	75	64	395,06	114 (31-144)	52,77	1955
10	75	75	217,03	123 (33-155)	56,48	2092

При использовании решеток №3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 образуются пропуски в спектре, как это реализовано в спектрометрах фирмы Agilent. Увеличение размеров фотоприемной матрицы при сохранении относительного отверстия приводит к ухудшению фокусировки оптической схемы и снижению разрешающей способности на краях детектора. В связи с этим необходимо заранее установить аналитические линии определяемых элементов, попадающие на детектор.

Кроме того, использование решеток № 4 и № 5 позволяет применять прямоугольную щель вместо отверстия благодаря увеличенному расстоянию между дифракционными порядками, что повышает светосилу прибора, но при этом возрастает количество пробелов в спектре.

Заключение

В данной работе рассмотрена возможность создания эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией для проведения атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой на базе отечественного каталога эшелле-решеток. В ходе исследования были определены потенциальные варианты решеток (№3, 4, 5, 7, 8, 9, 10) обеспечивающие спектральный диапазон от 167 до 780 нм с разрешающей способностью R = 30000, для фотоматрицы размером 1024×1024 пикселя с размером фотоячейки 27 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пелипасов О. В. и др. Аналитические возможности спектрометра «Гранд» при анализе растворов с использованием индуктивно-связанной плазмы //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №. 1 (II). – С. 82–85.

2. Labusov V. A. et al. Спектрометры оптические Гранд – новое средство измерения массовых долей определяемых элементов //Аналитика и контроль. – 2024. – Т. 28. – №. 3. – С. 259–269.

3. Бакшаев, М. К. Разработка оптической схемы эшелле-спектрографа / М. К. Бакшаев // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодежной научной конференции. В 6-ти томах, Казань, 07–08 ноября 2019 года. Том III. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 151–154.

4. Зарубин И. А. Малогабаритные многоканальные оптические спектрометры на основе схемы Черни-Тернера : дис. – автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: спец. 05.11. 07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Новосибирск, 2011.

5. Зарубин И. А. Возможности малогабаритного спектрометра «Колибри-2» в атомно-эмиссионном спектральном анализе //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – №. 1 р. II. – С. 114–117.

6. Борзов С. М. и др. Использование спектрометра «Колибри-2» для исследования излучения пламени //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – №. 7. – С. 13–18.

7. Дробышев А. И., Савинов С. С. Экспериментальное исследование аппаратной функции и разрешающей способности оптического цифрового спектрографа на базе полихроматора МФС //Оптический журнал. – 2014. – Т. 81. – №. 1. – С. 44–52.

8. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Бабин С. А. Анализаторы МАЭС с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 в сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии // Аналитика и контроль. – 2019. – Т. 23, №. 1. – С. 35–42.

9. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Зарубин И. А. Новый атомно-эмиссионный спектрометр «Гранд-2000» //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88. – №. 1 (II). – С. 27–33.

10. Лабусов В. А. и др. Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78. – №. 1-2. – С. 7–13.

11. Wang Y. et al. Construction, Spectral Modeling, Parameter Inversion-Based Calibration, and Application of an Echelle Spectrometer //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 14. – С. 6630.

12. Chen S. et al. A new type of wide spectral coverage echelle spectrometer design for ICP-AES //Optical Design and Testing V. – SPIE, 2012. – Т. 8557. – С. 347–355.

13. Zhang Y. et al. Echelle grating spectroscopic technology for high-resolution and broadband spectral measurement //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 21. – С. 11042.

14. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Машиностроение, 1975.

15. Пелипасов О. В. и др. Атомно-эмиссионные спектрометры с аргоновой индуктивно связанной плазмой Гранд-ИСП //Аналитика и контроль. – 2024. – Т. 28. – №. 4. – С. 370–381.

© А. А. Сырбаков, И. А. Зарубин, А. А. Дзюба, С. В. Додонов, 2025

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-214-217

И. А. Евдокименко[1]✉, Д. Е. Легостаев[1], К. А. Филиппский [1]

Движение пузырей в нисходящем потоке через пучок горизонтальных труб

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование движения газовых пузырей в модели с горизонтальным пучком труб при нисходящем потоке жидкости. Установлено, что при скорости потока 0,3 м/с пузыри всплывают, при 0,35–0,4 м/с – зависают в равновесии, а при 0,45–0,5 м/с – увлекаются вниз. Результаты демонстрируют ключевые режимы взаимодействия фаз, определяемые соотношением скорости жидкости и всплытия пузырей. Полученные данные важны для оптимизации работы теплообменного оборудования, где требуется контроль за газожидкостными потоками. Исследование выполнено с использованием высокоскоростной видеосъемки (500 кадр/с), обеспечившей детальную визуализацию процесса.

Ключевые слова: отрывное течение, двухфазный пузырьковый поток, теневая съемка, пучок труб

I. A. Evdokimenko[1]✉, D. E. Legostaev [1], K. A. Filippskii[1]

The movement of bubbles in a downward flow through a bunch of horizontal tubes

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: evdokimenko@itp.nsc.ru

Abstract. An experimental study of gas bubble motion in a model steam generator with a horizontal tube bundle under downward liquid flow was conducted. It was found that at a flow velocity of 0.3 m/s, bubbles rise upward; at 0.35–0.4 m/s, they remain suspended in equilibrium; and at 0.45–0.5 m/s, they are carried downward. The results reveal key two-phase flow regimes determined by the ratio of liquid velocity to bubble rise velocity. These findings are essential for optimizing heat exchanger performance where gas-liquid flow control is critical. The study employed high-speed videography (500,000 fps), enabling detailed visualization of the process.

Keywords: separation flow, two-phase bubble flow, shadow imaging, tube bundle

Введение

В настоящее время горизонтальные пучки труб используются в различных теплообменниках, например, испарителях, парогенераторах и др. Исследование двухфазного потока в моделях парогенератора необходимо для предотвращения аварийных ситуаций, которые могут возникнуть вследствие развития течения двухфазной среды. К примерам аварийной ситуации можно отнести разрыв трубки с последующим истечением дисперсной фазы, которая может попасть в тепловыделяющую сборку.

Изучение динамики пузырей, их распределения, скорости движения и взаимодействия с трубчатыми структурами важно для оптимизации тепломассообмена и предотвращения нежелательных эффектов, таких как колебания давления. Исследования показывают, что движение пузырей в горизонтальных пучках труб зависит от числа Рейнольдса, числа Вебера и физических свойств фаз. В работе [1] анализируется влияние вязкости жидкости на форму и скорость пузырей. В [2] выделены основные режимы течения: снарядный, эмульсионный и кольцевой. В [3] показано, что при увеличении скорости газа доминирующим становится снарядный режим. Работа [4] демонстрирует, что расстояние между трубами и их диаметр существенно влияют на динамику пузырей. В [5] предложена корреляция для расчета коэффициента трения в зависимости от шага труб. Исследования [6, 7] показывают, что наличие пузырей может как улучшать, так и ухудшать теплоотдачу в зависимости от режима течения. В [8] проведено CFD-моделирование движения пузырей в пучке труб, а в [9] представлены экспериментальные данные по визуализации потоков. Современные исследования фокусируются на применении машинного обучения для прогнозирования параметров двухфазных потоков [10], а также на разработке новых методов контроля и управления потоками [11].

Целью данной работы является определение закономерности движения пузырей через горизонтальный пучок труб при постоянном расходе и различных скоростях нисходящего потока.

Методы и материалы

Экспериментальная установка, изображенная на рис. 1, включает 55 горизонтальных стеклянных трубок, размещенных в три ряда и закрепленных прозрачными трубными досками из оргстекла. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, которая подавалась центробежным насосом сверху вниз в канал с горизонтальным пучком труб. Скорость потока варьировалась от 0 до 0,7 м/с. Рабочий газ (азот) поступал в канал через одиночный капилляр с расходом 30 мл/мин.

Для визуализации процесса истечения газовых пузырей применялась высокоскоростная камера, обеспечивающая съемку со скоростью 500 кадров в секунду. Длительность записи составляла 6 секунд.

Результаты

Были получены данные визуализации пузырькового течения в диапазоне скоростей нисходящего потока от 0,3 до 0,5 м/с. Они представлены на рис. 2.

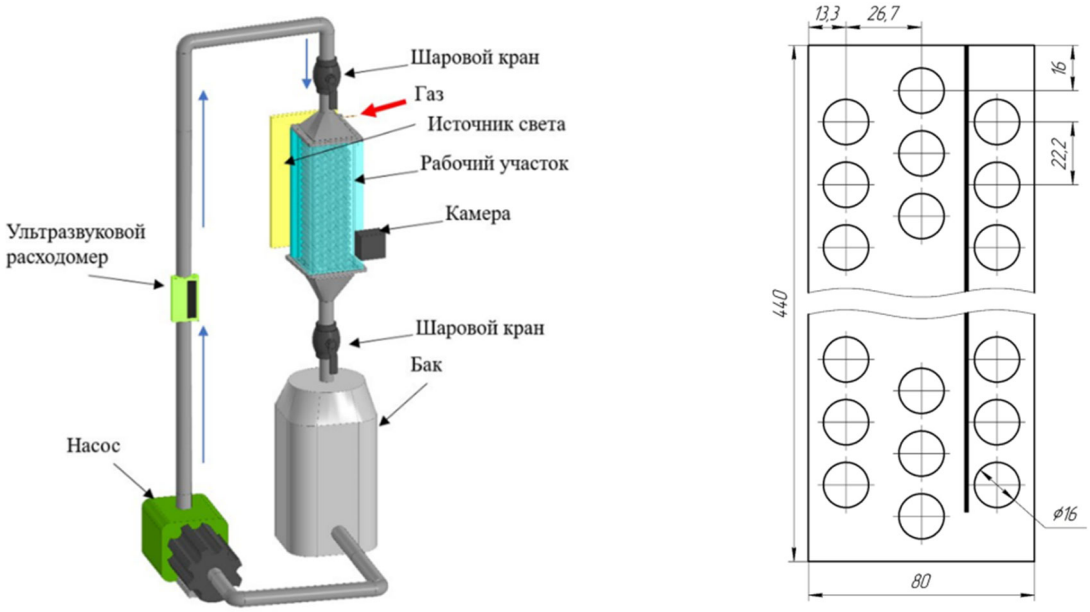
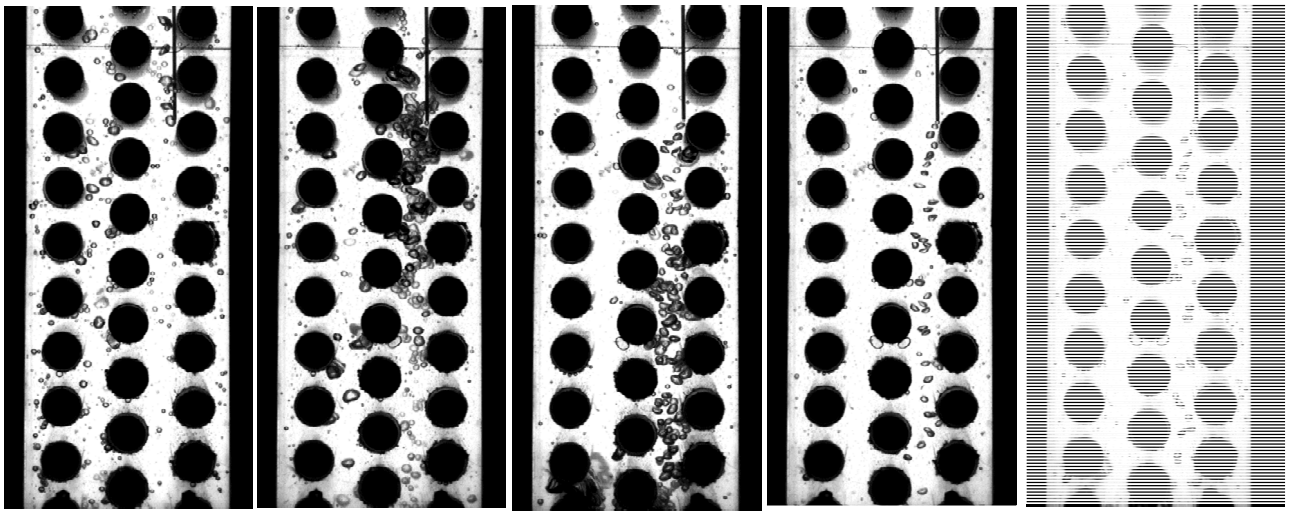


Рис. 1. Экспериментальная установка



$U_ж$ =0,3 м/с $U_ж$ = 0,35 м/с $U_ж$ = 0,4 м/с $U_ж$ = 0,45 м/с $U_ж$ = 0,5 м/с

Рис. 2. Фотографии пузырькового течения при расходе газа 30 мл/мин и различных скоростях нисходящего потока

Обсуждение

В ходе экспериментального исследования изучено поведение газовой фазы в модели парогенератора с горизонтальным пучком труб при различных скоростях нисходящего потока жидкости и постоянном расходе газа (30 мл/мин). Полученные результаты демонстрируют зависимость направления движения газовых пузырей от скорости жидкой фазы.

При скорости потока $U_ж$ = 0,3 м/с наблюдалось всплытие пузырей, что указывает на преобладание их собственной скорости всплытия над скоростью нисходя-

щего потока. В диапазоне $U_ж$ = 0,35–0,4 м/с газовые пузыри находились в состоянии динамического равновесия («зависания»), поскольку их скорость всплытия оказалась сопоставимой со скоростью течения жидкости. При дальнейшем увеличении скорости потока ($U_ж$ = 0,45–0,5 м/с) пузыри начинали двигаться вниз, что свидетельствует о преобладании скорости жидкости над их скоростью всплытия.

Эти данные позволяют сделать вывод о критических скоростях потока, при которых происходит смена режимов движения газовой фазы. Полученные результаты могут быть полезны для оптимизации работы парогенераторов и других теплообменных аппаратов, где важно контролировать распределение газожидкостных потоков.

Заключение

1. Проведено экспериментальное исследование движения газовой фазы в модели парогенератора с горизонтальным пуском труб при разных скоростях нисходящего потока при постоянном расходе газа.

2. Показано, что при $U_ж$=0,3 м/с пузыри двигаются вверх, т.к. их скорость всплытия больше скорости нисходящего потока.

3. Показано, что при $U_ж$=0,35 и $U_ж$=0,4 м/с пузыри зависают, т.к. их скорость всплытия примерно равна скорости нисходящего потока.

4. Показано, что при $U_ж$=0,45 и $U_ж$=0,5 м/с пузыри двигаются вниз, т.к. их скорость всплытия меньше скорости нисходящего потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang H., Li W., Wang Q. Bubble dynamics in viscous liquids // International Journal of Multiphase Flow. 2018. Vol. 102. P. 123–135.

2. Wang L., Chen X., Yang Y. Flow patterns in horizontal tube bundles // Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. Vol. 105. P. 109–120.

3. Chen Y., Zhang R., Liu P. Slug flow characteristics in tube arrays // Chemical Engineering Science. 2020. Vol. 220. Art. 115643.

4. Kim S., Lee J. Effect of tube spacing on bubble behavior // Nuclear Engineering and Design. 2017. Vol. 320. P. 45–56.

5. Mishima K., Hibiki T. Friction factor in two-phase flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 99. P. 718–730.

6. Kandlikar S.G. Heat transfer in bubbly flows // ASME Journal of Heat Transfer. 2015. Vol. 137, No. 5. Art. 051501.

7. Thome J.R. Boiling in tube bundles // Advances in Heat Transfer. 2016. Vol. 48. P. 255–290.

8. Lu J., Wang H., Zhang T. CFD simulation of bubble flow // Computers & Fluids. 2021. Vol. 214. Art. 104768.

9. Ozar B., Brooks C.S., Hibiki T. Experimental study of void fraction // International Journal of Multiphase Flow. 2013. Vol. 55. P. 28–39.

10. Zhou P., Li Y., Wang K. Machine learning for two-phase flow // AIChE Journal. 2022. Vol. 68, No. 3. Art. e17542.

11. Hibiki T., Ishii M. Control of two-phase flows // Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. Vol. 46. P. 245–267.

© И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский, 2025

УДК 532.529.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-218-222

А. В. Чинак[1]✉

Кластеризация монодисперсных пузырей в наклонной трубе

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: chinak@mail.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование процесса кластеризации пузырей в покоящейся жидкости в наклонной трубе с внутренним диаметром 33 мм. В экспериментах изучался процесс кластеризации пузырей, поведение кластеров в зависимости от их размеров (количества пузырей в кластере) и расхода газа. Измерения характеристик кластеров проводились на разных расстояниях от точки ввода газа (100-1000 мм). Исследование проводилось с помощью видеосъемки с последующей компьютерной обработкой данных.В экспериментах обнаружены режимы, когда пузыри выстраиваются в ряды, перпендикулярные направлению движения. Количество пузырей в ряду варьировалось от 2 до 5. При дальнейшем увеличении количества пузырей в ряду начиналось движение пузырей в пределах кластера. Для предотвращения слияния пузырей эксперименты проводились с дистиллированной водой с добавлением 3% этилового спирта

Ключевые слова: кластер, пузырь, измерение скорости

A. V. Chinak[1]✉

Clustering of monodisperse bubbles in an inclined tube

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: chinak@mail.ru

Abstract. An experimental study of the process of bubble clustering in a liquid at rest in an inclined tube with internal diameter of 33 mm was conducted. The experiments studied the process of bubble clustering, the behavior of clusters depending on their size (the number of bubbles in a cluster) and gas flow rate. Measurements of cluster characteristics were carried out at different distances from the gas injection point of 100-1000 mm. The study was carried out using video filming with subsequent computer data processing. The experiments revealed modes when bubbles line up in rows perpendicular to the direction of movement. The number of bubbles in a row varied from 2 to 5. With a further increase in the number of bubbles in a row, bubbles began to move within the cluster. To prevent bubble fusion, experiments were conducted with distilled water with the addition of 3% ethyl alcohol.

Keywords: cluster, bubble, velocity measurement

Введение

Многофазные пузырьковые течения характеризуются сложным взаимодействием между газовой и жидкой фазами, а также сильной чувствительностью к микромасштабным эффектам, включая наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ), геометрию канала и коллективное поведение пузырей. Особый интерес вызывает кластеризация пузырей – явление, при котором пузыри, несмотря на монодисперсность и одинаковую подъемную силу, стремятся к временной агрегации в

структуры. Это оказывает существенное влияние на характеристики псевдотурбулентности, перенос массы и импульса.

В работе [1] исследовано влияние поверхностно-активных веществ на структуру пузырьковых течений на разных масштабах. Авторы подчеркивают, что присутствие ПАВ изменяет поверхностное натяжение на границе пузыря, что, в свою очередь, влияет на форму, скорость и траекторию движения пузырей. Изменения, вызванные сорбцией ПАВ, проявляются не только на уровне отдельных пузырей, но и в глобальной структуре течения. Применение численного моделирования и теории многошкальных взаимодействий позволило авторам продемонстрировать, как локальные эффекты приводят к изменениям во всей гидродинамической структуре. Эти результаты особенно важны для точного моделирования пузырьковых течений в условиях реальных технологических процессов, где примеси и ПАВ часто присутствуют.

Figueroa-Espinoza и Zenit [2] сосредоточились на исследовании кластеризации пузырей в монодисперсных потоках при высоких числах Рейнольдса. Несмотря на кажущуюся упорядоченность потока, эксперименты показали ярко выраженную тенденцию пузырей к формированию кластеров. С помощью анализа пространственной корреляции авторы выявили, что пузыри образуют вертикально вытянутые структуры, ориентированные по направлению основного потока. Такое поведение обусловлено гидродинамическими взаимодействиями между пузырями, включая восходящие струи и сдвиговые поля. Полученные данные подчеркивают, что кластеризация возникает даже в условиях высокой монодисперсности и регулярного распределения пузырей на входе.

В исследовании Martínez Mercado и соавт. [3] представлены результаты комплексного изучения кластеризации пузырей и соответствующих спектров энергии в псевдотурбулентном режиме. Используя методы визуализации (PIV) и корреляционный анализ, авторы показали, что пузыри в вертикальных потоках не распределяются равномерно, а склонны к группировке в кластерные структуры. Особое внимание уделено анализу энергетических спектров: спектры демонстрируют отклонения от классической колмогоровской турбулентности. Работа подчеркивает важность учета кластеризации при разработке моделей псевдотурбулентности и при расчетах тепло- и массопереноса в двухфазных системах.

Результаты

В данной работе проведено экспериментальное исследование процесса кластеризации пузырей в покоящейся жидкости в наклонной трубе с внутренним диаметром 33 мм. (см. рис. 1). Угол наклона трубы был равен 45 градусов. Измерения характеристик кластеров проводились на разных расстояниях от точки ввода газа (100 – 1000 мм). Исследование проводилось с помощью видеосъемки с последующей компьютерной обработкой данных. Газ вводился через один капилляр.

Для сохранения монодисперсного состава пузырей и во избежание коалесценции (слияния) пузырей в воду, в качестве ПАВ, было добавлено 3% этилового спирта

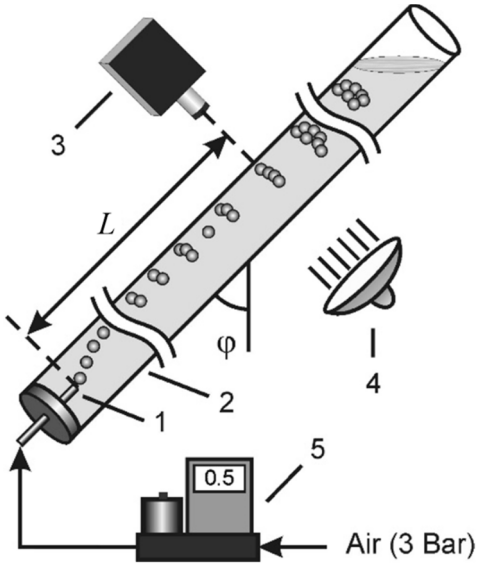


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – капилляр, 2 – стеклянная труба с внутренним диаметром D = 33 мм, 3 – скоростная камера Red Lake Motion Pro 2000, 4 – светодиодная лампа фронтального освещения, 5 – контроллер массового расхода воздуха “AALBORG”, L – расстояние между торцом капилляра и местом съемки

На рис. 2 приведены фотографии, сделанные через равные промежутки времени dT = 0,083 с. Снимки были сделаны на расстоянии L=250 мм от места ввода газа при расходе газа Q=0,47 мл/мин.

В экспериментах обнаружены режимы, когда пузыри, выстраиваются в ряды, перпендикулярные направлению движения. Количество пузырей в ряду варьировалось от 2 до 5. При дальнейшем увеличении количества пузырей в ряду, начиналось движение пузырей в пределах кластера.

По мере увеличения расхода газа, увеличивается скорость кластеризации пузырей.

Образование устойчивых пузырьковых кластеров происходит преимущественно в монодисперсной газожидкостной смеси с добавлением поверхностно-активного вещества (ПАВ). В случае большого разброса пузырей по размерам, скорость движения пузырей существенно отличается, что препятствует образованию устойчивых структур. При движении пузырей в чистой жидкости без добавления ПАВ, вероятность коалесценции пузырей возрастает, что затрудняет образование кластеров.

Скорость движения пузырей измерялась с помощью PIV методики. При минимальном расходе газа (Q=0,18 мл/мин), когда пузыри можно было считать «одинокими», скорость всплытия пузырей была равна 0,106 м/с.

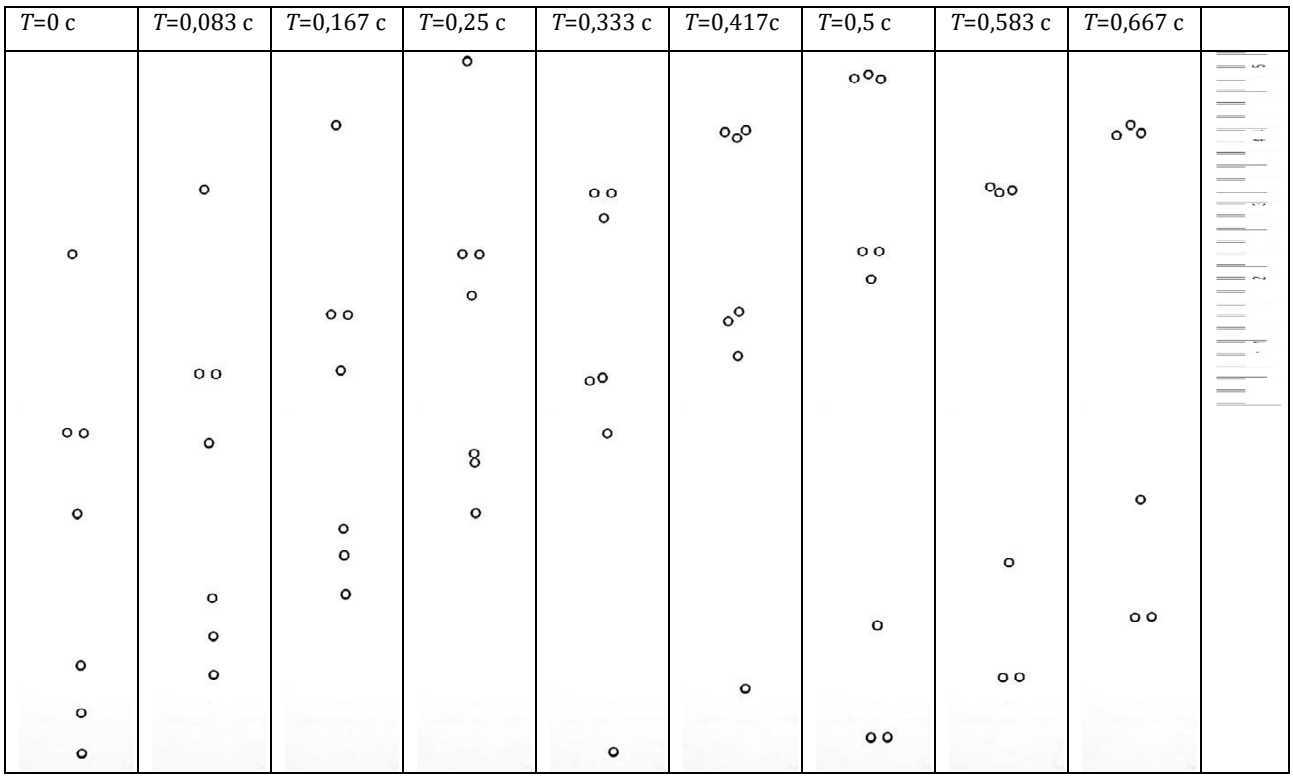


Рис. 2. Объединение пузырей в кластеры. Расход газа Q=0,47 мл/мин. Расстояние от места ввода газа L=250 мм

На рис. 3 приведена гистограмма размеров пузырей. Видно, что размеры пузырей укладываются в узкий пик. Это подтверждает, что пузырьковое течение было монодисперсным.

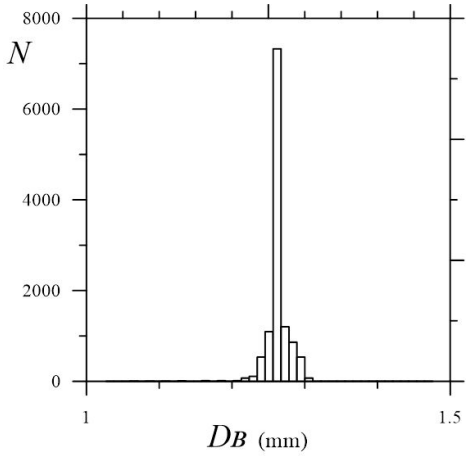


Рис. 3. Гистограмма диаметра пузырей. Расход газа Q=0,2 мл/мин. Расстояние от места ввода газа L=560 мм

На рис. 4 приведены снимки пузырьковых кластеров на разных расстояниях от места ввода газа. Видно, что по мере движения пузырей они объединяются в кластеры все больших размеров. Следует отметить, что отрыв пузырей происходит через равные промежутки времени. Вплоть до 4 – 5 пузырей в кластере дви-

жутся, выстроившись в одну линию. При дальнейшем увеличении кластера пузыри начинают активно двигаться внутри кластера.

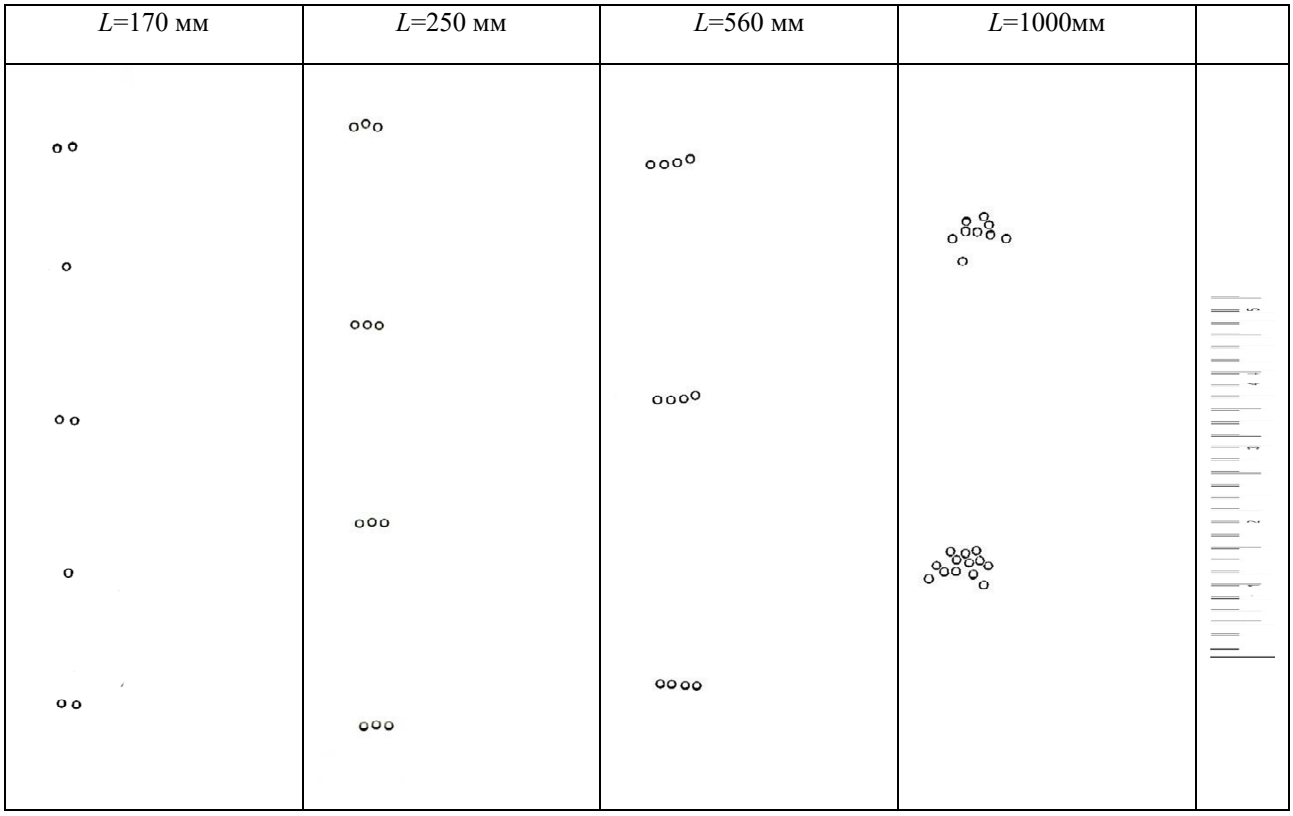


Рис. 4. Кластеризация пузырей по длине трубы. Расход газа 0,5 мл/мин

Заключение

Проведено экспериментальное исследование процесса кластеризации пузырей в покоящейся жидкости в наклонной трубе с внутренним диаметром 33 мм. В экспериментах изучался процесс кластеризации пузырей, поведение кластеров в зависимости от их размеров (количества пузырей в кластере) и расхода газа. Измерения характеристик кластеров проводились на разных расстояниях от точки ввода газа (100 – 1000) мм. Исследование проводилось с помощью видеосъемки с последующей компьютерной обработкой данных.

В экспериментах обнаружены режимы, когда пузыри, выстраиваются в ряды, перпендикулярные направлению движения. Количество пузырей в ряду варьировалось от 2 до 5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Takagi S., Ogasawara T., Matsumoto Y. The effects of surfactant on the multiscale structure of bubbly flows //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2008. – Т. 366. – №. 1873. – С. 2117–2129.

2. Figueroa-Espinoza B., Zenit R. Clustering in high Re monodispersed bubbly flows //Physics of Fluids. – 2005. – Т. 17. – №. 9.

3. Martínez Mercado, J., Chehata Gomez, D., van Gils, D.P.M., Sun, C., & Lohse, D. On bubble clustering and energy spectra in pseudo-turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 650, pp. 287–306.

© А. В. Чинак, 2025

УДК 532.14
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-223-228

М. А. Воробьев[1]✉, А. О. Кархов[1,2]

Применение теневого фонового метода для измерения плотностной стратификации в водно-соляном растворе

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Аннотация. Исследование стратифицированных жидкостных сред имеют важное научное и практическое значение, поскольку такие среды широко распространены как в природных системах, так и в промышленных технологиях. Особый интерес приобретают экспериментальные методы, позволяющие воспроизводить устойчивые градиенты плотности. В данной работе применение теневого фонового метода в сочетании с PIV-анализом позволили не только визуализировать процесс диффузии и перераспределения соли в растворе, но и количественно отследить динамику стратификации. Полученные результаты демонстрируют переход от ступенчатого распределения плотности к линейному, а также увеличение концентрации соли у дна сосуда при длительном наблюдении.

Ключевые слова: синтетический теневой метод, плотностная стратификация, PIV

M. A. Vorobyev[1]✉, A. O. Karhov[1,2]

Application of the BOS technique for measuring density stratification in a water-salt solution

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Abstract. The study of stratified fluid media holds significant scientific and practical importance, as such environments are widespread in both natural systems and industrial technologies. Experimental methods capable of reproducing stable density gradients are of particular interest. In this work, the application of the BOS technique combined with PIV analysis not only enabled visualization of the diffusion and redistribution processes of salt in the solution but also allowed for quantitative tracking of stratification dynamics. The obtained results demonstrate a transition from a step-like density distribution to a linear one, as well as an increase in salt concentration near the vessel bottom during prolonged observation.

Keywords: background oriented schlieren technique, density stratification, PIV

Введение

Стратифицированные жидкостные среды определяют динамику океанических течений и атмосферных процессов. В промышленности стратифицированные потоки используются для разделения веществ, повышения эффективности теплообмена и создания многослойных материалов. Однако, управление такими системами остается сложной задачей из-за их чувствительности к внешним воз-

действиям и турбулентным возмущениям. Особый интерес представляют течения в стратифицированных жидкостях, где баланс между плавучестью и вязкостью формирует сложные гидродинамические структуры – внутренние волны, слоистые струи и зоны устойчивой стратификации. Для экспериментального изучения стратифицированных сред важно создавать устойчивые градиенты, сохраняющиеся в течение достаточно длительного времени. Существует ряд способов получения стратифицированных сред: 1) смешивание газов с различной плотностью; 2) дифференциальный нагрев слоев жидкости или газа; 3) создание градиента концентрации растворенного вещества. Главным недостатком первых двух способов является высокая скорость диффузии ($D \approx 0{,}1 - 1$ см^2/с). При создании раствора с градиентом концентрации растворенного вещества (например, раствор хлорида натрия в воде) $D \approx 10^{-5}$ см^2/с при комнатной температуре, что обеспечивает характерные времена существования стратифицированного раствора порядка $t = L^2 / (\pi^2 D)$ [1], что при высоте столба жидкости L = 150 мм превышает 20 суток.

Для детального исследования стратификации жидкостей применяются различные оптические методы, среди которых особенное место занимает синтетический теневой фоновый метод, известный в англоязычной литературе как Background Oriented Schlieren (BOS) method. Этот метод позволяет визуализировать и количественно оценить градиенты показателя преломления в прозрачных средах с высокой точностью, что особенно важно при изучении тонких слоев смешения в водно-соляных растворах.

Таким образом, целью данной работы, является экспериментальное исследование плотностной стратификации в водно-соляном растворе с применением теневого фонового метода.

Методы и материалы

Экспериментальная установка представляла собой видеокамеру DMK 33GX264 33G Series (фокусное расстояние объектива 50 мм), стеклянную кювету 160×13×170 мм, и светодиодную панель, расположенные, как показано на рис. 1. К светодиодной панели была прикреплена прозрачная пленка с фоновым изображением. В качестве фонового изображения был выбран случайный паттерн (рис. 2) с характерным шагом 0,5 мм, в работе [2] показано, что применение такого фона позволяет избежать артефактов обработки, появляющихся при использовании фонов с регулярными изображениями. Кювета при помощи шприцевого насоса и капиллярной трубки медленно заполнялась слоями водного раствора хлорида натрия, в каждом следующем слое концентрация соли была выше, чем в предыдущем. Так как плотность водного раствора хлорида натрия растет пропорционально массовой концентрации соли [3], то слои с большей концентрацией вытесняют слои с меньшей концентрацией вверх. В процессе эксперимента температура рабочей жидкости и окружающей среды была равна 20 °C.

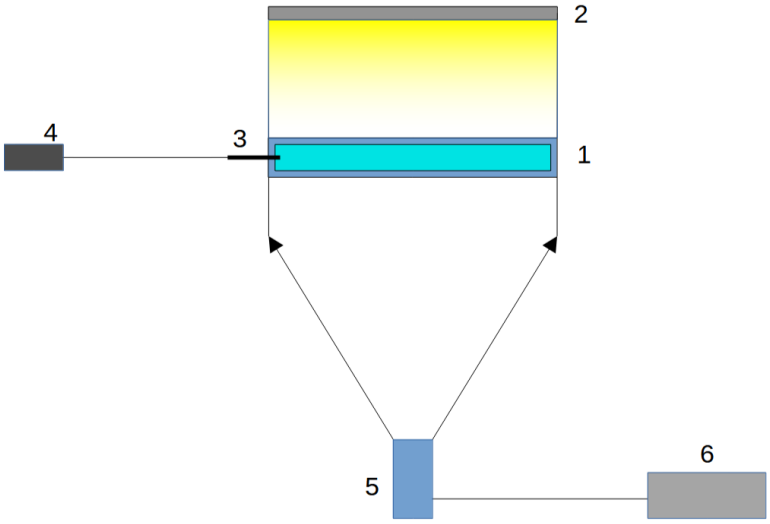


Рис. 1. Схема установки: 1 – кювета; 2 – источник света; 3 – капилляр; 4 – шприц; 5 – камера;6 –компьютер



Рис. 2. Элемент фонового изображения

Так как показатель преломления соляного раствора линейно связан с его плотностью [1], для исследования плотностной стратификации солевого раствора применятся оптический метод, чувствительный к показателю преломления среды. Принцип используемого синтетического теневого метода состоит в следующем: видеокамера фокусируется на экране с некоторым рисунком, между камерой и экраном расположен исследуемый объект. Световые лучи, проходящие от фона через исследуемый объект, отклоняются в связи с оптической неоднородностью объекта. Таким образом, изображения фона, отснятые камерой при наличии неоднородности на оптическом пути, будут отличаться от опорных изображений фонового рисунка, полученных при однородном оптическом пути. Исходя из сравнения текущего и опорного изображения, могут быть рассчитаны величины виртуального смещения пикселей фонового изображения. Для количественного измерения малых смещения пикселей фонового изображения использовался кросскорреляционный алгоритм, применяемый при PIV (particle image velocimetry) анализе. Обработка проводилась с использованием программного пакета PIVLab в среде MatLab.

На рис. 3 представлена схема движения лучей в экспериментальной установке. Как показано в работе [4] в приближении малых углов координату светового луча по вертикальной оси Z в случае его прохождения через две стенки кюветы и стратифицированную среду в ней, можно записать в виде:

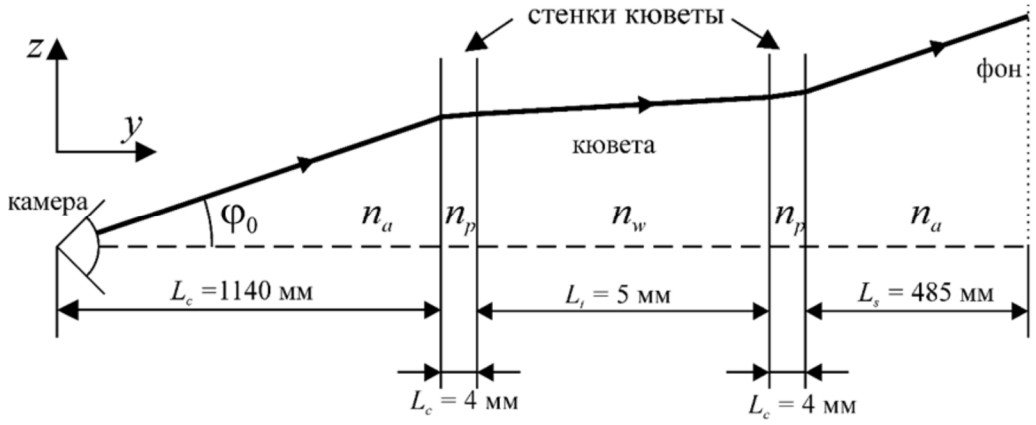


Рис. 3. Схема движения световых лучей

$$z\left(\frac{dn}{dz},\varphi_0\right)\approx L_c\varphi_0+L_p\left(n_a/n_p\right)\varphi_0+L_t\left(n_a/n_w\right)\varphi_0+\frac{1}{2n_w}\frac{dn}{dz}L_t^2+$$
$$+L_p\left(n_a/n_p\right)\varphi_0+L_p\left(n_w/n_p\right)\varphi_0\frac{1}{n_w}\frac{dn}{dz}L_t+L_s\left(n_w/n_a\right)\frac{1}{n_w}\frac{dn}{dz}, \quad (1)$$

где n_a, n_p и n_w – показатели преломления воздуха, стекла и воды. В качестве опорного изображения использовался кадр с кюветой, наполненной чистой водой. Таким образом, смещение светового луча относительно опорного изображения можно представить, как:

$$\Delta z\left(\frac{dn}{dz},\varphi_0\right)\approx\frac{1}{2n_0}\frac{dn}{dz}L_t^2+L_p\left(n_w/n_p\right)\varphi_0\frac{1}{n_0}\frac{dn}{dz}L_t+L_s\left(n_w/n_a\right)\frac{1}{n_0}\frac{dn}{dz}L_t=$$
$$=\frac{1}{2n_0}\frac{dn}{dz}L_t\left(L_t+2L_p\left(n_w/n_p\right)\varphi_0+2L_s\left(n_w/n_a\right)\right). \quad (2)$$

Выразив из уравнения (2) градиент показателя преломления, получим:

$$\frac{dn}{dz}\approx\frac{2n_0\Delta z}{L_t\left(L_t+2L_p\left(n_w/n_p\right)\varphi_0+2L_s\left(n_w/n_a\right)\right)}, \quad (3)$$

где φ_0 можно представить, как $\varphi_0 = z / \left(L_c + L_p + L_s \right)$.

Результаты

При проведении эксперимента кювета была наполнена слоями растворов соли с возрастающей относительной концентрацией: 0; 0,1; 0,2; 0,3 и 0,5 от предельной растворимости C_0 = 36% (36 г соли на 100 г воды). Высота каждого слоя составляла 2,5 см, за исключением раствора с концентрацией 0,3, для которого использовался слой высотой 5 см. Результаты PIV анализа приведены на рис. 4. Цветовая шкала соответствует величине сдвига пикселей вдоль оси Z между текущим и опорным изображениями. В начальный момент (рис. 4 а) видна четкая стратификация растворов различной концентрации, что визуально подтверждается наличием выраженных границ между слоями. С течением времени (рис. 4а-г) происходит постепенное размытие границ слоев, обусловленное процессом диффузии. Через 76 часов (рис. 4 г) границы между слоями стали практически неразличимыми, сформировав раствор с линейной стратификацией практически по всей высоте кюветы.

По значениям смещений пикселей, полученных при PIV обработке экспериментальных данных, и с помощью соотношения (3) были рассчитаны градиенты показателя преломления по высоте кюветы. Исходя из линейной связи плотности раствора и его показателя преломления, а также считая, что в верхней точке концентрация соли равна нулю и, соответственно, плотность раствора равна плотности чистой воды, были рассчитаны значения плотности раствора на различных высотах (рис. 5).

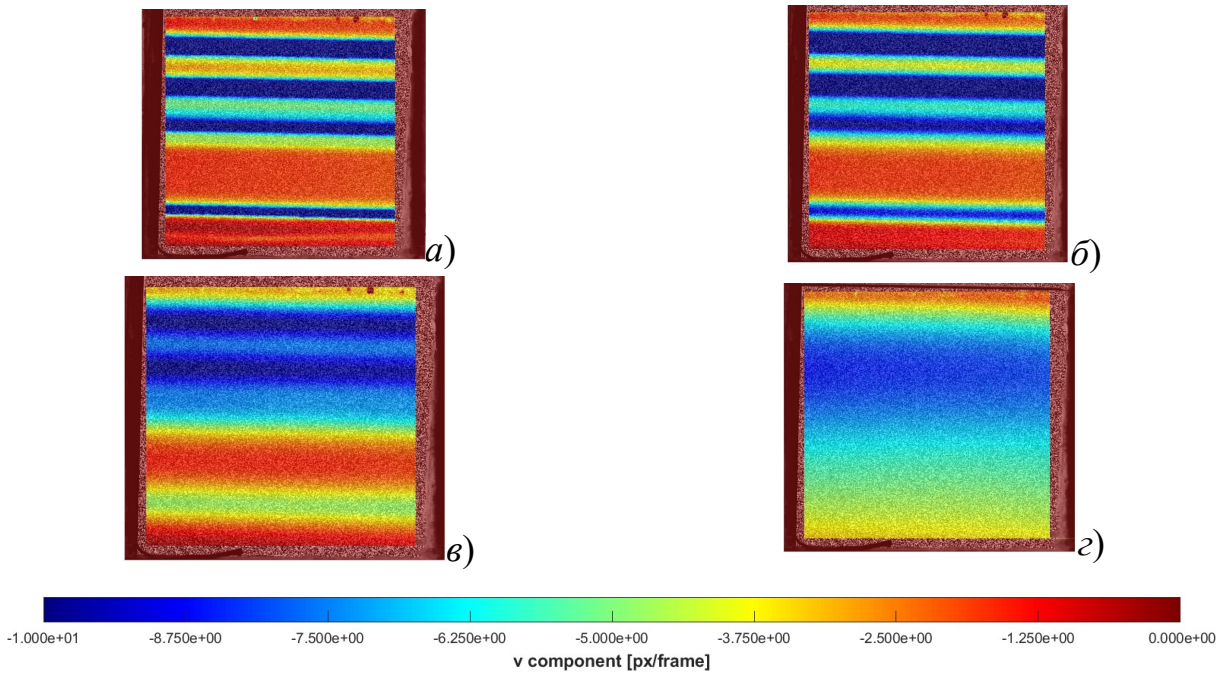


Рис. 4. Изменение границ раздела слоев с течением времени:

а) начало эксперимента; *б*) 1 час; *в*) 5,5 часов; *г*) 76 часов

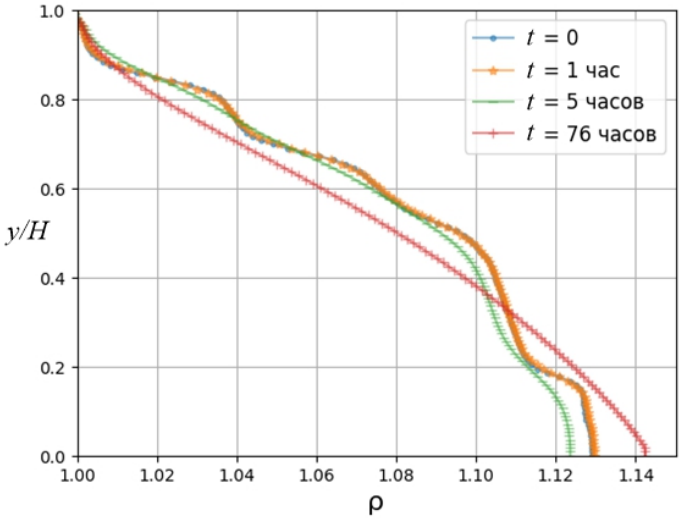


Рис. 5. Зависимость плотности раствора от высоты

Заключение

В данной работе была исследована применимость теневого фонового метода в сочетании с PIV анализом для изучения плотностной стратификации в водно-соляном растворе. Теневой фоновый метод позволил визуализировать процесс диффузии и перераспределения соли в растворе, а также количественно отслеживать процесс изменения стратификации среды. Результаты демонстрируют переход от ступенчатого распределения плотности к линейному профилю по высоте сосуда. Так же обнаружено увеличение концентрации у дна сосуда при длительном времени наблюдении.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания для Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D.E. Mowbray, The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids, J. Fluid Mech. 27 (1967) 595–608. https://doi.org/10.1017/S0022112067000564.

2. М.А. Воробьев, С.В. Двойнишников, В.Г. Меледин, В.В. Рахманов, Тестирование быстрого алгоритма для BOS метода с различными фоновыми паттернами, Interexpo GEO-Siberia. 8 (2024). https://doi.org/10.33764/2618-981X-2024-8-1-112-117.

3. K.M. Aly, E. Esmail, Refractive index of salt water: effect of temperature, Opt. Mater. (Amst). 2 (1993) 195–199. https://doi.org/10.1016/0925-3467(93)90013-Q.

4. B.R. SUTHERLAND, S.B. DALZIEL, G.O. HUGHES, P.F. LINDEN, Visualization and measurement of internal waves by ‘synthetic schlieren’. Part 1. Vertically oscillating cylinder, J. Fluid Mech. 390 (1999) 93–126. https://doi.org/10.1017/S0022112099005017.

© М. А. Воробьев, А. О. Кархов, 2025

УДК 532.295.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-229-233

М. А. Воробьев[1]✉, А. О. Кархов[1,2]

Влияние поверхностно-активных веществ на скорости всплытия пузырей в наклонном канале

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Аннотация. Исследование посвящено анализу воздействия поверхностно-активных веществ (ПАВ) на размеры пузырьков газа и скорость их подъема в наклонном трубопроводе. Эксперименты проводились в трубе диаметром 32 мм при расходе газа 3 мл/мин и угле наклона 50°. Параметры пузырьков, включая их распределение по размерам и скорость движения, определялись методом теневой фотосъемки с последующей автоматической обработкой изображений. Изучались растворы с концентрацией этанола 0%, 1% и 3%. Результаты показали, что введение ПАВ снижает диаметр отрыва пузырей от капилляра и значительно уменьшает частоту их слияния в потоке.

Ключевые слова: наклонная труба, пузыри, коалесценция, поверхностно-активные вещества

M. A. Vorobyev[1]✉, A. O. Karhov[1,2]

Effect of surfactants on bubble rise velocities in an inclined channel

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Abstract. This study investigates the effects of surfactants on gas bubble size distribution and ascent velocity in an inclined tube. Experiments were conducted in a 32 mm diameter tube at a gas flow rate of 3 mL/min and an inclination angle of 50°. Bubble parameters, including size distribution and velocity, were analyzed using shadow photography combined with automated image processing. Ethanol solutions with concentrations of 0%, 1%, and 3% were tested. The results demonstrate that surfactant addition reduces the capillary detachment diameter of bubbles and significantly suppresses coalescence frequency in the flow.

Keywords: inclined tube, bubbles, coalescence, surfactants

Введение

Пузырьковые течения широко применяются в технике благодаря уникальным свойствам, отсутствующим в однофазных потоках. Добавление газа в жидкость изменяет ее гидродинамику, например, усиливая тепло- и массообмен. Влияние газовой фазы зависит от комплекса факторов: расхода фаз, геометрии канала, направления потока и дисперсности пузырей. Точные данные о параметрах таких течений критичны для моделирования и повышения безопасности систем. Несмотря на обширные исследования восходящих и опускных потоков в

прямых каналах, работы по наклонным системам остаются редкими. Особенно мало изучены мелкодисперсные течения, хотя даже 1,5-2% газа способны значительно менять структуру потока и теплообмен. Эксперименты выявили пик теплопередачи при углах 30–45° [1], что подтверждено также численными моделями [2]. Контроль размера пузырей в наклонных каналах осложняется их слиянием, ведущим к переходу в снарядный режим. Решение этой проблемы связано с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые подавляют коалесценцию [3] и стабилизируют пузырьковый режим. ПАВ могут влиять на диаметр отрыва пузырей [4] и их динамику, расширяя диапазон рабочих параметров, соответствующих пузырьковому режиму течения. Цель исследования – анализ воздействия ПАВ на распределение пузырей по размерам и скоростям при инжекции газа через капилляр в наклонном канале. Эксперименты проводились при вариациях расхода газа, угла наклона и расстояния от точки инжекции, что позволило оценить динамику дисперсности газовой фазы.

Методы и материалы

Экспериментальная установка (рис. 1) включала компрессор 1, подающий воздух через капилляр 2 (внутренний диаметр 0,2 мм) в жидкость. Расход газа измерялся и регулировался газовым контроллером Bronkhorst.

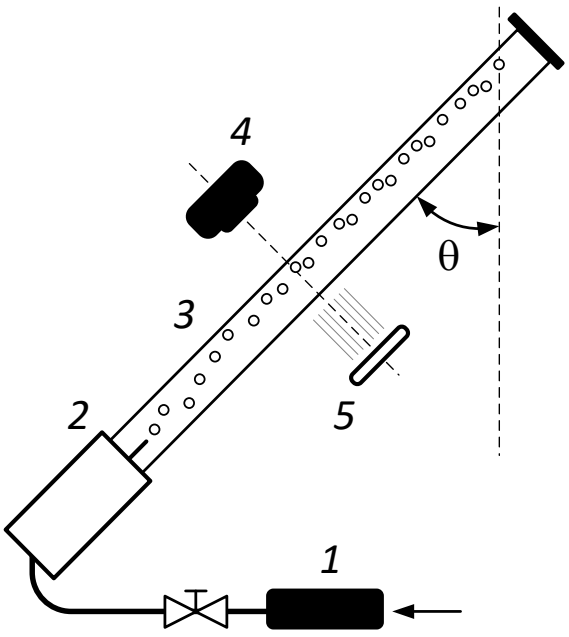


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – система подачи газа; 2 – капилляр; 3 – рабочий участок; 4 – камера; 5 – LED-матрица.

Рабочий участок 3 представлял собой прозрачную трубу из оргстекла длиной 1,2 м и диаметром 32 мм. В качестве жидкости использовался водный раствор этанола. Съемка пузырей осуществлялась камерой Nikon Zfc (120 кадр/с) с подсветкой LED-матрицей. Изображения обрабатывались алгоритмом на базе OpenCV, определяющим диаметр пузыря через эквивалентную площадь и ско-

рость при сравнении последовательных кадров. Расстояние от точки ввода газа до зоны съемки составляло $L = 400$ мм, угол наклона трубы от вертикали $\theta = 50°$, расход газа $Q_g = 3$ мл/мин. Эксперимент проводился при массовых концентрациях этилового спирта 0, 1, 3%. Температура рабочей жидкости поддерживалась равной 25°C.

Результаты

На рис. 2 приведено сравнение результатов, полученных при расходе газа 3 мл/мин в чистой воде, в 1% и 3% спиртовом растворе, измерения проводились на расстоянии 400 мм вдоль канала от точки ввода газа. По вертикальной оси отложено отношение объема пузырей из выборки в заданном диапазоне размеров к полному объему газа в выборке. Видно, что наличие ПАВ приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырей, что качественно согласуется с соотношением $d_b \sim \sigma^{1/3}$ из [4], где d_b – диаметр пузыря, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Также, наличие поверхностно-активного вещества существенно снижает вероятность коалесценции пузырей по пути следования вдоль наклонной поверхности. При использовании в качестве рабочей жидкости дистиллята наблюдается активное объединение пузырей, что приводит к полному исчезновению первичного пика на гистограмме, соответствующему пузырям отрывного диаметра. В случае использования раствора ПАВ (и 1%, и 3%), как видно на гистограмме, наибольшая часть объема воздуха транспортируется пузырями отрывного диаметра.

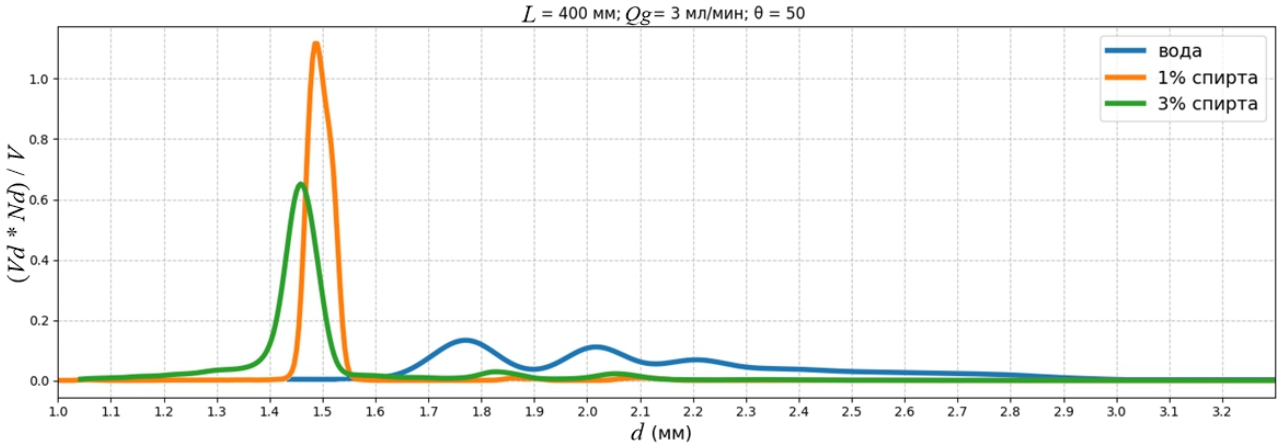


Рис. 2. Распределение пузырей по размерам

На рис. 3 представлены распределения пузырей по скоростям в зависимости от диаметра. Видно, что, когда в качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода, наблюдается полидисперсное течение – спектр по размерам пузырей практически непрерывен. При этом средняя скорость пузырей монотонно возрастает от 0,15 до 0,2 м/с при увеличении размера пузыря. При добавлении ПАВ большая часть газа концентрируется в пузырях нескольких раз-

меров – отрывного диаметра, двойного и тройного объемов. Можно заметить существенной разброс по скоростям всплытия в случае 3% спирта и для пузырей отрывного диаметра для 1% спирта. Также, в отличие от случая чистой воды, при добавлении ПАВ не наблюдается явной тенденции к росту скорости всплытия пузырей с увеличением их размеров. Это связано с тем, что пузыри большего объема догоняют кластеры из маленьких пузырей, из-за добавления ПАВ это не приводит к их коалесценции, крупные пузыри упираются в мелкие и всплывают со скоростью, определяемой скоростью всплытия пузырькового кластера.

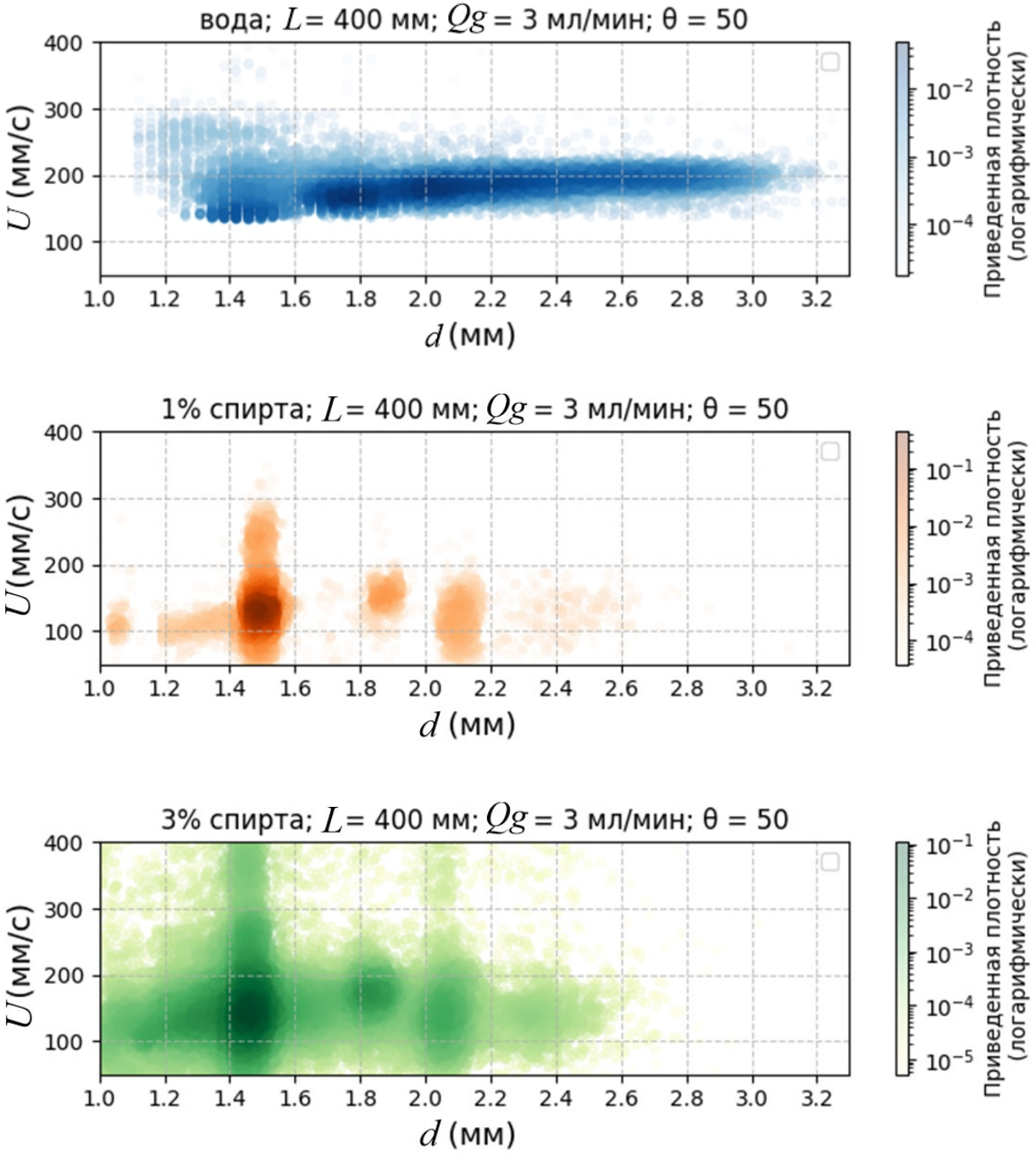


Рис. 3. Распределение пузырей по скоростям

Заключение

Было проведено экспериментальное исследование распределений по размерам и скоростям всплытия пузырей, формирующихся на одиночном капилляре в покоящейся жидкости с содержанием поверхностно-активных веществ в наклонном канале. Показано, что добавление в воду спирта в качестве поверхностно-активного вещества существенно изменяет дисперсный состав газожидкостной смеси. Обнаружено значительное подавление процесса коалесценции пузырей по пути следования вдоль наклонной поверхности. Добавление ПАВ приводит к тому, что скорость всплытия отдельный пузырей перестает расти с увеличением их размеров, а определяется скоростью всплытия пузырькового кластера, подавляющую часть которого составляют пузырьки отрывного диаметра.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания для Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A.V. Chinak, A.E. Gorelikova, O.N. Kashinsky, M.A. Pakhomov, V.V. Randin, V.I. Terekhov, Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow, Int. J. Heat Mass Transf. 118 (2018) 785–801. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.022.

2. S. Khodadadi, M.H. Taleghani, D. Domiri Ganji, M. Gorji-Bandpy, Heat transfer enhancement via bubble dynamics along an inclined wall, Int. Commun. Heat Mass Transf. 145 (2023) 106829. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106829.

3. Q. Xu, M. Nakajima, S. Ichikawa, N. Nakamura, P. Roy, H. Okadome, T. Shiina, Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization, J. Colloid Interface Sci. 332 (2009) 208–214. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.12.044.

4. M. Jamialahmadi, H. Miiller-Steinhagen, Effect of alcohol, organic acid and potassium chloride concentration bubble size, bubble rise velocity and gas hold-up in bubble columns, 1992.

© М. А. Воробьев, А. О. Кархов, 2025

УДК 532.5, 53.05
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-234-237

М. В. Кашкарова[1]✉, С. В. Какаулин[1], К. С. Зубанов[1], А. Ю. Кравцова[1]

Цифровая визуализация кавитационного обтекания крыла в щелевом канале

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Аннотация. Кавитация часто возникает в процессе работы высоконапорного гидротехнического оборудования в областях низкого давления. Изучению этого явления посвящено множество работ, поскольку кавитация вносит вклад в поток, изменяя его характеристики, а так же приводит к разрушению частей гидросооружений. Кавитация может возникать не только в основном потоке, но и в щелевых зазорах оборудования в области расположения креплений и различных перемычек. Кавитационные пузыри, возникающие в зазорах, могут, выходя из области зазора, оказывать влияние и на основной поток [1, 2]. В настоящей работе рассмотрено кавитационное обтекание крылового профиля с нанесенной структурированной шероховатостью в щелевом канале. Компьютерное моделирование кавитации реализовано в прграммном пакете STAR CCM+.

Ключевые слова: кавитация, щелевой канал, крыло, число Рейнольдса, структурная шероховатость

M. V. Kashkarova[1]✉, S. V. Kakaulin[1], K. S. Zubanov[1], A. Yu. Kravtsova[1]

Digital visualization of the cavitation flow of a hydrofoil in a slit channel

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: m.agafontseva@gmail.com

Abstract. Cavitation often occurs during the operation of the high-pressure hydraulic equipment in low-pressure areas. A lot of work has been devoted to the study of this phenomenon, since cavitation contributes to the flow – it changes its characteristics, and also leads to the destruction of parts of hydraulic structures. Cavitation can occur not only in the main stream, but also in the slits of the equipment in the area of the fasteners and various jumpers. Cavitation bubbles arising in the slits can also affect the main flow when leaving the slit area [1, 2]. In this paper, the cavitating hydrofoil with an applied structured roughness in a slit channel is considered. Computer simulation of cavitation is implemented in the STAR CCM+ software package.

Keywords: cavitation, slit channel, hydrofoil, Reynolds number, structured roughness

Введение

Поскольку кавитация, неизбежно возникающая в ходе работы гидрооборудования, приводит к негативным последствиям, исследованию методов подавления и управления кавитацией посвящено множество работ. Так, в [3] изучалось влияние выступающих кромок и поверхностных рифлений на кавитационные характеристики и возникновение шумов, генерируемых судами на подводных кры-

льях. Методы управления и подавления кавитации на крыловых профилях и исследование структуры кавитационных каверн были описаны в [4]. В основном, работы описывают явление кавитации при обтекании крыла в макромасштабных, широких каналах. Исследования в узких, так называемых щелевых каналах практически не проводились. В [5] исследовано обтекание цилиндрической преграды в щелевом канале. В работе показана динамика развития кавитационной каверны, и определены частоты процесса. В настоящей работе исследовано кавитационное обтекание преграды в виде крыла с нанесенной шероховатостью в щелевом канале. Исследовано поле скорости в области структурированной шероховатости.

Методы и материалы

Для моделирования кавитационного течения в щелевом канале использовался пакет STAR CCM+. Расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед, повторяющий размеры экспериментальной установки ИТ СО РАН: длина канала – 145 мм, ширина – 120 мм, глубина – 1,2 мм (рис. 1).

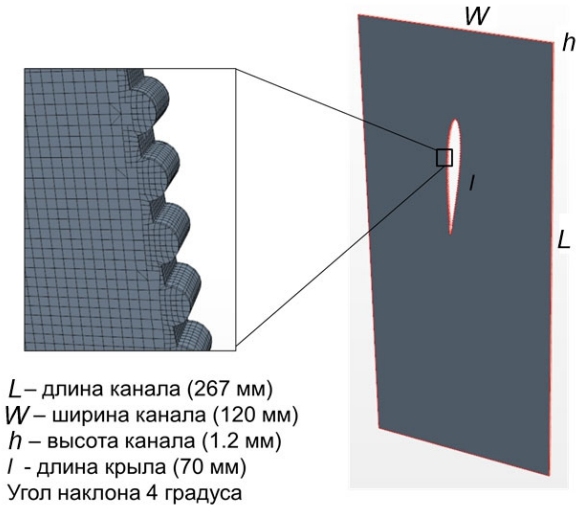


Рис. 1. Расчетная область

Преграда представляла собой крыловой профиль NACA 012 длиной 70 мм с нанесеной структурированной шероховатостью, представляющей из себя цилиндрические выемки диаметром 0,5 мм, центры образующих окружностей которых расположены на расстоянии 1,5 мм. Носовая часть преграды располагается на расстоянии 50 мм от входа в канал. Угол наклона крыла составлял 4º. Расчетная сетка включала в себя $2{,}3 \cdot 10^6$ ячеек. В области тела обтекания было произведено измельчение сетки. Число Куранта в расчете не превышало 0,5. Рабочая жидкость – вода. Предполагалось, что в потоке в области тела обтекания образуется вторая фаза – водяной пар.

В качестве управляющих уравнений для описания динамики трехмерного двухфазного нестационарного обтекания крылового профиля с нанесенной

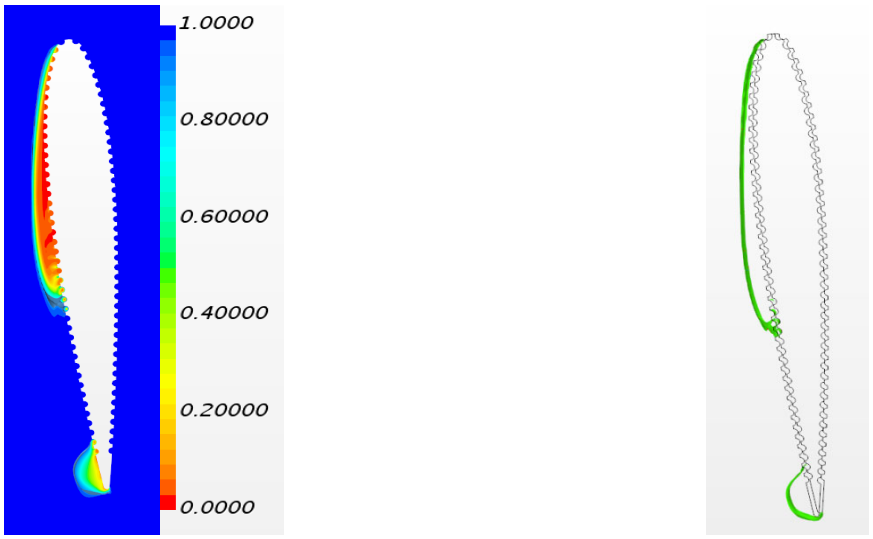
структурированной шероховатостью в щелевом канале использовались уравнения Навье-Стокса. Для описания турбулентности была выбрана *k*-ω модель. Для определения границ между паровой фазой и водой использовался метод VOF (volume of fluid) с применением схемы захвата границ раздела с высоким разрешением (HRIC).

Динамика роста разрушения кавитационных пузырьков описывалась моделью Рэлея-Плессета.

В качестве граничных условий на входе задавалось значение скорости и соотношение частей компонентов рабочей жидкости: 1 – вода, 0 – водяной пар. На выходе задавалось значение избыточного давления (0 атм), что соответствует условию сводного истечения, а соотношение частей компонентов менялось на: 0,98 – вода, 0,02 – водяной пар. Стенки канала и тело обтекания считались непроницаемыми, скорость течения на стенке полагалась равной 0 м/с.

Результаты

Для анализа процесса обтекания крылового профиля со структурированной шероховатостью в центральном сечении канала были построены поля концентрации (рис. 2а).



а) *б*)

Рис. 2. Поле конценртации воды – *а*) и визуализация поверхности присоединенной каверны – *б*)

Присоединенная каверна образуется в носовой части крыла и растет вниз по потоку. Еще одно ядро зарождения и роста каверны располагается в хвостовой части крыла. Присоединенные каверны после образования сначала растут, а затем схлопываются с отрывом свободного кавитационного пузыря. На рис. 2(б) представлена визуализация прикрепленных кавитационных каверн.

На рис. 3 представлено векторное поле скоростей в области присоединенной кавитационной каверны. Видно, что направление потока в выемках шероховато-

сти противоположно скорости потока. Таким образом, можем утверждать, что в области каверны образуется область противотока.

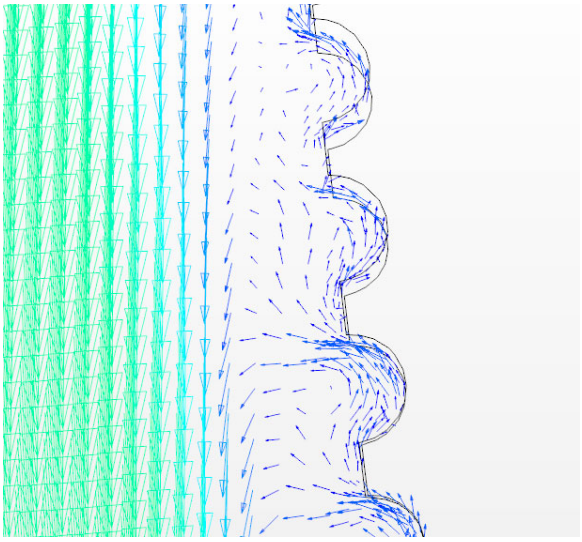


Рис. 3. Поле векторов скоростей под присоединенной кавитационной каверной

Заключение

Проведено моделирование кавитационного обтекания крыла с нанесенной структурированной шероховатостью. Построены поля концентрации, и визуализированы границы кавитационных каверн. Исследована структура течения вблизи тела обтекания.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Galinovskii, A.L. Corrosion: Materials, Protection Rationale and Prospects for Using Protection Methods for Surfaces of Marine Internal Combustion Engines from Cavitation. Steel Transl. 54, 293–297 (2024). https://doi.org/10.3103/S0967091224700669.

2. S. Skripkin, Z. Zuo, M. Tsoy, P. Kuibin, and S. Liu, “Oscillation of cavitating vortices in draft tubes of a simplified model turbine and a model pump–turbine 1 B,” Energies 15(8), 2965 (2022).

3. Fahri Ç. et al. Experimental investigation of leading-edge tubercle and surface corrugation effects on cavitation and noise in partially cavitating twisted hydrofoils. Ocean Engineering, Volume 324, 2025, 120646, ISSN 0029-8018, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120646.

4. Qianfeng Q. et al. Research progress in hydrofoil cavitation prediction and suppression methods. Physics of Fluids 1 January 2025; 37 (1): 011301. https://doi.org/10.1063/5.0245462.

5. Kashkarova M. V., Kravtsova A. Cavitation initiated by the circular cylinder in the slit channel. Journal of Flow Visualization and Image Processing, DOI: 10.1615/JFlowVisImageProc.2025057355.

© М. В. Кашкарова, С. В. Какаулин, К. С. Зубанов, А. Ю. Кравцова, 2025

УДК 531.3, 53.05, 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-238-241

А. А. Гусейнов[1,2], Д. В. Литвинова[1,2], А. Ю. Кравцова[1,2]✉

Юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации для исследований течений жидкости в микроканалах с препятствиями

[1] Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Аннотация. Юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации позволяет добиться качественной визуализации картины гидродинамики течения жидкости в микрофлюидных каналах с цилиндрическим телом обтекания при скорости течения до 20 м/с.

Ключевые слова: цифровая трассерная визуализация, микроканал, цилиндрическое тело обтекания, поле скорости

A. A. Guseinov[1,2], D. V. Litvinova[1,2], A. Y. Kravtsova[1,2]✉

Alignment of the particle image velocimetry equipment for investigations of the fluid flows in microchannels with bluff body

[1] Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kravtsova.alya@gmail.com

Abstract. Adjustment of the particle image velocimetry equipment allows achieving high-quality visualization of the hydrodynamic picture of the fluid flow in microfluidic channels with a cylindrical body at a flow velocity of up to 20 m/s.

Keywords: particle image velocimetry, microchannel, circular cylinder, flow velocity

Введение

Метод цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV) основывается на отслеживании движения мельчайших частиц-трассеров, равномерно распределенных в исследуемом потоке жидкости или газа. Эти частицы освещаются лазерным импульсом, сформированным в тонкий лазерный «нож», расположенный в плоскости наблюдения. Высокоскоростные камеры фиксируют последовательные изображения освещенных трассеров с минимальной временной задержкой между кадрами. Анализируя смещение частиц между последовательными изображениями, можно определить мгновенные поля скоростей в плоскости лазерного сечения.

Изучение кавитации в микромасштабах до сих пор является сложной задачей. Традиционным методом исследования является высокоскоростная теневая визуализация [1], позволяющая определять режимы кавитационного течения и, иногда, возникновение неустойчивостей в потоке. Зачастую, для более глубокого понимания процессов, происходящих в небольших объемах жидкости, нужны

количественные характеристики, такие как средняя скорость потока, пульсационная составляющая скорости и т.д. Метод цифровой трассерной визуализации может стать одним из эффективных и простых методов исследования кавитационных течений [2].

Актуальность исследования определяется необходимостью более глубокого осмысления и анализа сложных процессов, применимых в современных научных и технических областях [3-5]. Метод трассерной визуализации представляет собой надежный инструмент, позволяющий исследовать динамику потоков жидкостей и газов, что имеет ключевое значение для решения экологических, инженерных и медицинских задач [6, 7]. В условиях глобальных изменений климата и загрязнения окружающей среды возможность отслеживать перемещение загрязняющих веществ становится особенно актуальной для разработки эффективных стратегий охраны экосистем.

Кроме того, с развитием технологий и методов обработки данных, трассерная визуализация открывает новые горизонты для оптимизации инженерных процессов и повышения их эффективности. Измерение скорости потока до десятков метров в секунду в каналах малого размера требует дальнейшего развития метода цифровой трассерной визуализации. В статье описана юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации для исследования потоков жидкости в каналах микронного размера.

Параметры экспериментального стенда

Изучение свойств движения жидкости в каналах микронного размера как в условиях кавитации, так и в докавитационных режимах течения проводится на гидродинамическом стенде исследования многофазных и критических течений Института теплофизики. Стенд включает в себя различные компоненты. Основным оптическим прибором установки является инвертированный люминесцентный микроскоп производства АО «ЛОМО» г. Санкт-Петербург. В микроскоп входят набор объективов x4…x40, блоки светофильтров UV, B, G, два оптических входа для осветителей и видео тубус. Канал микронного размера устанавливается на предметный столик микроскопа. Глубина канала составляет 200 мкм, ширина 2 мм, длина 5 см. В центральной части канала находится тело цилиндрической формы высотой 200 мкм и диаметром 1 мм. Скорость жидкости варьировалась в диапазоне от 0,01 м/с до 20 м/с. Поведение потока жидкости вблизи тела обтекания представляет наибольший интерес для исследования.

Для измерения количественных характеристик потока в микроканале была проведена юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации.

Методика измерений

Для исследования скоростных характеристик потока жидкости в каналах микронного размера использован метод цифровой трассерной визуализации. Принцип метода заключается в следующем. В жидкость добавляются флуоресцентные трассерные частицы размером 2 мкм нейтральной плавучести [8]. В качестве источника светового излучения использовался импульсный лазер

Beamtech Vlite-Hi с излучателем Nd:YLF, длительность лазерного импульса (~200 нс), энергия импульса в пучке 20 мДж. Частота повторения импульсов до 10 кГц. Минимально возможная частота повторения импульсов 200 Гц. Длина волны светового излучения составляла 527 нм («зеленый» световой диапазон). Свет, попадая на трассерные частицы, отражается от них в «красном» световом диапазоне с длиной волны около 645 нм, после чего фиксируется на камере.

Для фиксации картины движения частиц требуется использовать скоростные камеры с хорошим матричным разрешением (2048x2048 Мпикс) и разрядностью более 8 бит. В исследовании использовалась камера Photron fastcam s12. Максимальная частота съемки составляет 1 000 000 к/с. Камера и лазер управлялись специальным программным обеспечением с помощью компьютера. Работа лазера и камеры должна быть синхронизирована с точностью до 1 нс. Для решения этой проблемы была проведена оценка физической задержки открытия затвора камеры и лазера. Полученные задержки были учтены в программе управления синхронизатором.

Для того, чтобы иметь возможность исследовать течение жидкости в каналах микронного размера, расположенных на столике микроскопа, измерительная система цифровой трассерной визуализации была внедрена в микроскоп. Для доставки лазерного излучения к исследуемому объекту система лазерного излучения была дополнена «рукой», с длинной световода 1,8 м, а также оптической системой позволяющей рассеивать пучок в 1,3 раза. Далее лазерный свет проходит по оптическому пути внутри микроскопа и через объектив засвечивает микроканал. Яркий отраженный свет также проходит через объектив микроскопа и по оптическому пути попадает на матрицу камеры, что позволяет зафиксировать точное положения трассерных частиц в потоке. Далее с помощью расчета последующих смещений частиц была получена картина распределения скоростей потока жидкости. Измерение мгновенного поля скорости потока основано на вычислении смещения трассерных частиц, находящихся в плоскости лазерного ножа. Обработка изображений в программном обеспечении «Actualflow» позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двумерное поле скорости.

Обработка экспериментальных данных

Для расчета двумерного поля скорости на первом этапе обработки проводилось вычитание среднего по интенсивности изображения, рассчитанного по серии из 1000 изображений. Эта процедура позволяет компенсировать неоднородность экспозиции изображения для кадров, удалить блики с изображений. Далее изображение разбивалось на расчетные области. Было рассмотрено два типа расчетных областей: квадратные 128x128 и 64x64 пикселя, а также расчетные области, вытянутые вдоль по потоку 256x128, 128x64 пикселя. Перекрытие расчетных областей составляло 50% и 75%. Поля мгновенной скорости рассчитывались с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма с непрерывным смещением и деформацией элементарных расчетных ячеек. Подпиксельная интерполяция кросскорреляционного пика осуществлялась по трем точкам с ис-

пользованием одномерной аппроксимации функцией Гаусса. По результатам полученных расчетов было установлено, что оптимальным размером расчетной ячейки для каналов микроразмера являются прямоугольные области, и перекрытие расчетных областей должно составлять 50%. Поля скорости с такими расчетными ячейками имеют относительно низкий уровень шума и высокое пространственное разрешение.

Заключение

Было показано, что юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации со скоростным короткоимпульсным лазером и высокоскоростной камерой с высокими техническими характеристиками, такими как короткое время экспозиции (~200 нс), микроскопом и сложным световым путем, позволяет добиться качественной визуализации картины гидродинамики течения жидкости в микрофлюидных каналах с цилиндрическим телом обтекания при скорости течения до 20 м/с.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств государственного задания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lobasov A. S., Skripkin S. G., Tsoy M. A., Kravtsova A. Y. Investigation of the cavitation processes behind a cylinder located in a microchannel in a wide range of Reynolds numbers // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 38. P. 102306.

2. Keane R. D., Adrian R. J., Zhang Y. Super-resolution particle image velocimetry // Meas. Sci. Technol., 1995. V. 6, P. 754–768.

3. Roetmann K., Schmunk W., Garbe C. S., Beushausen V. Exp. Fluids. 2008. V. 44. P. 419–430.

4. Sinton D. Microfluidics and Nanofluidics. 2004. V. 1. P. 2–21.

5. Santiago J. G., Wereley S. T., Meinhart C. D., Beebe D. J., Adrian R. J. Exp. Fluids. 1998. V. 25. P. 316–319.

6. Hoffmann M., Schluter M., €abiger N. R. Chemical Engineering Science. 2006. V. 61. P. 2968–2976.

7. Hoffmann M., Schluter M., Rabiger N. Chemie Ingenieur Technik. 2007. V. 79. P. 1067–1075.

8. Kravtsova A. Yu. Visualization of Flow Regimes in Symmetric Microchannel in Case of Different Inlet Flowrate Ratios for Fixed Outlet Reynolds Number // Journal of Engineering Thermophysics Vol. 29, No. 4, 2020.

© А. А. Гусейнов, Д. В. Литвинова, А. Ю. Кравцова, 2025

УДК 004.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-242-245

Д. Н. Титов[1]✉, *Е. В. Рыжкова*[1]

Применение ИИ в интернете вещей

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: alena.tarasova.2014@mail.ru

Аннотация: В статье рассматриваются современные подходы к применению периферийных вычислений и искусственного интеллекта (ИИ) в рамках концепции Интернета энергии (IoE), как одного из направлений развития Интернета вещей (IoT). Рассматриваются возможности применения периферийного искусственного интеллекта в системах IoE. Анализируются преимущества локальной обработки данных для повышения энергоэффективности, снижения задержек, обеспечения безопасности и автономного управления. Особое внимание уделено угрозам информационной безопасности и ограничениям периферийных устройств в IoT-среде [1–5].

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), Интернет энергии (IoE), периферийные вычисления, искусственный интеллект, информационная безопасность

E. V. Ryzhkova[1]✉, *D. N. Titov*[1]

Application of AI in the Internet of things

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: alena.tarasova.2014@mail.ru

Abstract. The article discusses modern approaches to the use of edge computing and artificial intelligence (AI) within the concept of the Internet of Energy (IoE), as one of the areas of development of the Internet of Things (IoT). The possibilities of using edge artificial intelligence in IoE systems are considered. The advantages of local data processing for increasing energy efficiency, reducing latency, ensuring security and autonomous control are analyzed. Particular attention is paid to information security threats and limitations of edge devices in the IoT environment [1–5].

Keywords: Internet of Things (IoT), Internet of Energy (IoE), edge computing, artificial intelligence, information security

Введение

Сегодня повышается актуальность разработки инновационных решений для снижения уровней выбросов углекислого газа. Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), особенно в сфере повышения энергоэффективности, становятся важным инструментом в достижении этих целей [6–8].

Одним из актуальных направлений является использование периферийных вычислений – альтернативы традиционным облачным системам. Данные технологии позволяют более эффективно контролировать энергопотребление в зданиях. Сложные интеллектуальные системы, основанные на концепциях Интернета вещей (IoT) и алгоритмах искусственного интеллекта (ИИ), позволяют формировать так называемый Интернет энергии (IoE) – распределенную цифровую

среду, в которой все элементы энергосистемы (потребители, производители, аккумуляторы, устройства учета и контроля) объединены в единую сеть. Данная сеть, позволяет анализировать и регулировать потребление энергии в реальном времени [9–13]. Применение Интернета энергии способствует интеграции возобновляемых источников энергии в энергосеть, что, в свою очередь, влияет на осознанность потребителей, которая повышается через их информированность.

ИИ помогает контролировать потребление энергии, обнаруживать аномалии и прогнозировать неисправности, используя большие данные для принятия решений. Хотя облачные технологии широко применяются в целях энергоэффективности, они не лишены недостатков – в частности, требуют значительных ресурсов и могут способствовать дополнительной нагрузке на сеть. В этом плане применение периферийного ИИ позволит снизить задержки, осуществит оптимизацию обработки данных и тем самым уменьшит энергозатраты [14–16].

Методы и материалы

Современные методы контроля энергопотребления и оптимизации эксплуатационных затрат используют облачные технологии, которые требуют высокой вычислительной мощности [17].

Однако, с развитием технологий 5G и распространением IoT-устройств возникает возможность перераспределения нагрузки, благодаря чему локальная обработка данных снижает зависимость от энергоемких центров обработки информации и повышает устойчивость систем к внешним воздействиям. Все вышеперечисленное способствует не только ускорению обработки данных и принятию решений, но и позволяет повысить уровень безопасности.

Периферийные вычисления ускоряют анализ информации за счет минимизации расстояния между источником данных и процессором, это не только повышает производительность, но и увеличивает надежность, особенно в критических ситуациях, когда решение нужно принять в течение секунд. Таким образом, обработка на месте повышает уровень защиты, поскольку данные не покидают локальную сеть, что снижает вероятность их утечки [18].

Периферийные вычисления обеспечивают обработку данных непосредственно в месте их формирования, что существенно снижает задержки и позволяет оперативно реагировать на критические события без обращения к удаленным серверам. Данный способ особенно важен в производственной или технологической среде, где промедление может привести к сбоям. Локальная обработка данных позволяет уменьшить нагрузку на сеть и энергопотребление устройств за счет сокращения объема передаваемых данных. По мере роста числа IoT-устройств периферийный подход обеспечивает масштабируемость, позволяя исключить узкие места в системах. Кроме того, децентрализация повышает уровень информационной безопасности и конфиденциальности, а также способствует созданию автономных систем управления, принимающих решения на основе локальных данных [19–20].

Результаты

Вычисления на границе сети позволяют минимизировать задержки и повысить безопасность обработки данных, это важно для систем, работающих в режиме реального времени. В энергетике применение локальных ИИ-решений позволяет обеспечить эффективное управление потреблением: например, устройства автоматически переводят в спящий режим при отсутствии нагрузки.

Технологии мониторинга без вмешательства (NILM) позволяют точно отслеживать энергопотребление и оперативно выявлять аномалии, включая несанкционированное использование энергии. Такие подходы способствуют предотвращению потерь.

Периферийные вычисления также оптимизируют распределение энергии, перераспределяя нагрузку между сетевыми линиями и облегчая интеграцию возобновляемых источников в энергосистему, все это делает систему более гибкой и устойчивой к перегрузкам.

Локальная обработка данных также снижает риски утечек и усиливает защиту конфиденциальной информации. Однако перенос традиционных облачных механизмов безопасности на периферию затруднен из-за географического размещения устройств и их ограниченных ресурсов.

Однако необходимо рассмотреть и основные проблемы безопасности периферийных систем:

— уязвимость устройств из-за слабой аппаратной защиты;
— сложности в аутентификации и контроле доступа;
— проблемы управления доверием между разными участниками системы;
— необходимость регулярных обновлений ПО при ограниченных ресурсах.

Для эффективной защиты таких систем требуется учитывать специфику их архитектуры, ограниченные возможности вычислений и их сетевые особенности.

Заключение

Внедрение периферийных вычислений в энергетику демонстрирует высокий потенциал для повышения энергоэффективности, устойчивости и безопасности интеллектуальных систем. Обработка данных на месте их возникновения позволяет существенно сократить задержки, снизить нагрузку на сеть и минимизировать энергозатраты. При этом важно учитывать особенности архитектуры и ограниченные ресурсы периферийных устройств, что требует комплексного подхода к вопросам кибербезопасности. Развитие Интернета энергии и локальных ИИ-решений становится ключевым направлением цифровой трансформации энергетической отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суомалайнен А., Интернет вещей: видео, аудио, коммутация: ДМК Пресс, 2019. – 122 с.
2 Santucci, G. The internet of things: Between the revolution of the internet and the metamorphosis of objects. Vision and Challenges for Realising the Internet of Things, 2010. – P. 11–24.
3) Мачей К., Интернет вещей новая технологическая революция: Эксмо, 2017. – 330.

4) Sardeshmukh, H., & Ambawade, D. Internet of Things: Existing protocols and technological challenges in security. In Intelligent Computing and Control, 2017 International Conference on IEEE. – Pp. 1–7.

5) Zarpelão, B. B., Miani, R. S., Kawakani, C. T., & de Alvarenga, S. C. 2017. A survey of intrusion detection in Internet of Things. Journal of Network and Computer Applications, 84, 25–37.

6) Al-Gburi, A., Al-Hasnawi, A., & Lilien, L. Differentiating Security from Privacy in Internet of Things: A Survey of Selected Threats and Controls. In Computer and Network Security Essentials. Springer, Cham. 2018. – Pp. 153–172.

7) В. П. Мешалкин, А. Ю. Пучков, Е. И. Лобанева, М. И. Дли. Предварительная оценка прагматической ценности информации в задаче классификации на основе глубоких нейронных сетей // Прикладная информатика. – 2021. – Т. 16. № 3. – С. 9–20.

8) Krishna, B. S., & Gnanasekaran, T. A systematic study of security issues in Internet-of-Things (IoT). In I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), 2017 International Conference on. 2017, February. – Pp. 107–111.

9) Ramadhan, A. A survey of security aspects for Internet of Things in healthcare. In Information Science and Applications (ICISA) 2016 (pp. 1237–1247). Springer, Singapore.

10) Varadarajan, P., & Crosby, G. Implementing IPsec in wireless sensor networks. In New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2014 6th International Conference on (pp. 1–5). IEEE.

11) Sain, M., Kang, Y. J., & Lee, H. J. (2017, February). Survey on security in Internet of Things: State of the art and challenges. In Advanced Communication Technology (ICACT), 2017 19th International Conference on (pp. 699–704). IEEE.

12) Yang, Y., Wu, L., Yin, G., Li, L., & Zhao, H. (2017). A survey on security and privacy issues in internet-of-things. IEEE Internet of Things Journal, 4(5), 1250–1258.

13) Свон, Мелани. Блокчейн: схема новой экономики. – М.: «Олимп-бизнес», 2017. – 240 с. – ISBN 978-5-9693-0360-7.

14) P. Ocheja, B. Flanagan, H. Ueda, and H. Ogata, “Managing lifelong learning records through blockchain,” Research and Practice in Technology Enhanced Learning, vol. 14, no. 1, pp. 1–19, 2019.

15) J. Y. Chun and G. Noh, “Blockchain-based access control audit system for next generation learning management,” KIPS Transactions on Software and Data Engineering, vol. 9, no. 11, pp. 351–356, 2020.

16). M. Jirgensons and J. Kapenieks, “Blockchain and the future of digital learning credential assessment and management,” Journal of Teacher Education for Sustainability, vol. 20, no. 1, pp. 145 – 156, 01 Jun. 2018. https://content.sciendo.com/view/journals/jtes/20/1/article-p145.xml.

17) Колосок Ирина Николаевна, Коркина Елена Сергеевна Применение облачных и граничных технологий при развитии интеллектуальной энергосистемы // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. №4 (36). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-oblachnyh-i-granichnyh-tehnologiy-pri-razvitii-intellektualnoy-energosistemy (дата обращения: 19.05.2025).

18) Adams and A. Blandford, “Security and online learning: to protect or prohibit,” in Usability Evaluation of Online Learning Programs, C. Ghaoui, Ed. UK: IDEA Publishing, March 2003, pp. 331–359.

19) Pedro Franco. The Blockchain // Understanding Bitcoin: Cryptography, Engineering and Economics. – John Wiley & Sons, 2014. – 288 p. – ISBN 978-1-119-01916-9.

20) Raval S. Decentralized Applications. Harnessing Bitcoin's Blockchain Technology. – 2016. – 118 c. – ISBN 978-1-491-92454-9.

© Д. Н. Титов, Е. В. Рыжкова, 2025

УДК 004.56
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-246-252

А. А. Киселев[1]✉, В. М. Белов[2]

Методика оценивания уровня защищенности объектов КИИ с использованием нечеткой логики

[1] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: anton.kiselev@corp.nstu.ru

Аннотация. Настоящая методика предназначена для оценивания уровня защищенности объектов критической информационной инфраструктуры (ОКИИ) с использованием нечеткой логики с целью своевременного выявления, оценивания и прогнозирования источников угроз информационной безопасности (ИБ), причин и условий, способствующих нанесению ущерба обладателю информации и ее оператору, нарушению нормального функционирования и развития информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС) при проведении аудиторских проверок внутреннего аудита организации работы ОКИИ на соответствие требованиям безопасности информации.

Ключевые слова: методика оценивания, уровень защищенности, критическая информационная инфраструктура, нечеткая логика, лингвистическая шкала

A. A. Kiselev[1]✉, V. M. Belov[2]

Methodology for assessing the security level of critical information infrastructure facilities using fuzzy logic

[1] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: anton.kiselev@corp.nstu.ru

Abstract. This methodology is designed to assess the security level of critical information infrastructure objects (OCII) in order to timely identify, assess and predict sources of information security threats, causes and conditions that contribute to damage to the information owner and operator, disruption of the normal functioning and development of information and telecommunications systems when conducting audits of the internal audit organization of the OCII for compliance with information security requirements.

Keywords: assessment methodology, security level, critical information infrastructure, fuzzy logic, linguistic scale

Введение

Анализ опубликованных работ наглядно демонстрирует важность и обстоятельность исследований по теме статьи. В конечном итоге точность результата оценивания напрямую зависит от количества учтенных факторов, что приводит и к возрастанию трудоемкости расчетов.

Настоящая методика предназначена для оценивания уровня защищенности ОКИИ [1-5] с целью своевременного выявления, оценивания и прогнозирования источников угроз ИБ, причин и условий, способствующих нанесению ущерба обладателю информации и ее оператору, нарушению нормального функционирования и развития ИТКС при проведении аудиторских проверок внутреннего аудита организации работы ОКИИ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации», самооценки защищенности ОКИИ (планового периодического контроля ИБ) на соответствие требованиям документов по ИБ. Оценивание уровня защищенности ОКИИ проводят с использованием балльной и лингвистической шкал в рамках нечеткого логического вывода.

Представление методики оценивания уровня защищенности ОКИИ

Методика оценивания уровня защищенности ОКИИ заключается в определении коэффициента важности (КВ) вопросов и разделов методом парного сравнения, по которым проводят оценивание уровня защищенности ОКИИ, в построении эталонных значений всех уровней защищенности ОКИИ методом лингвистических термов (допускается применение и других методов построения функций принадлежности (ФП) для построения эталонных значений), в обработке значений результатов ответов сотрудников отдела информационной безопасности (ОИБ), сотрудника, ответственного за обеспечение ИБ с использованием теории нечетких множеств (ТНМ): определение суммарной оценки уровня защищенности ОКИИ (показателя уровня защищенности) и в сравнении со всеми эталонными значениями уровней защищенности ОКИИ, на основании которого определяют уровень защищенности ОКИИ.

Оценка уровня защищенности ОКИИ строится на сформированном перечне вопросов, касающихся разных влияющих на уровень безопасности параметров безопасности. Ответы на вопросы (по разделам) позволяют получить представление о степени выполняемости требований нормативных источников, что в совокупности позволяет получить интегральную оценку. При этом проводят расчет КВ для каждого вопроса внутри разделов, соответственно, эталонных значений, определяющих уровни защищенности ОКИИ. Расчет КВ разделов и вопросов осуществляют компетентные специалисты в области ИБ (вышестоящих подразделений ОКИИ или коллегиально).

При оценивании уровня защищенности ОКИИ вопросы, по которым проводят оценивание, должны охватывать все составляющие ИБ. Варианты ответов (шкалы ответов) строятся таким образом, чтобы учесть все возможные исходы в каждом случае оценивания. При оценивании для объективности привлекаются любые сведущие специалисты организации.

Критерии оценивания и значения соответствия балльных ответов лингвистическим значениям (термам) нечеткой переменной «Уровень защищенности» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценивания и значения соответствия балльных ответов лингвистическим значениям (термам) нечеткой переменной «Уровень защищенности»

Балльная оценка	Лингвистическая оценка	Соответствие текущему состоянию вопроса
0	полное отсутствие защищенности на ОКИИ	Требования, степень выполнения которых не установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, не выполняются
0-0,08	очень низкая оценка уровня защищенности (ОНОУЗ)	Требования, степень выполнения которых не в полном объеме установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, неактуальны и не выполняются
0,09-0,25	низкая оценка уровня защищенности (НОУЗ)	Требования, степень выполнения которых полностью установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, неактуальны и выполняются не в полном объеме
0,26-0,42	средняя оценка уровня защищенности (СОУЗ)	Требования, степень выполнения которых полностью установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, неактуальны и выполняются в полном объеме
0,43-0,58	неизменная оценка уровня защищенности (НеОУЗ)	Требования, степень выполнения которых не в полном объеме установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, актуальны и выполняются не в полном объеме
0,59-0,75	нормальная оценка уровня защищенности (НоОУЗ)	Требования, степень выполнения которых полностью установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, актуальны и выполняются не в полном объеме
0,76-0,92	высокая оценка уровня защищенности (ВОУЗ)	Требования, степень выполнения которых не в полном объеме установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, актуальны и выполняются своевременно в полном объеме
0,93-1	очень высокая оценка уровня защищенности (ОВОУЗ)	Требования, степень выполнения которых полностью установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, актуальны и выполняются своевременно в полном объеме
1	полная защищенность ОКИИ	Требования, степень выполнения которых полностью установлена во внутренних нормативных документах ОКИИ, актуальны и выполняются своевременно в полном объеме

Оценивание уровня защищенности ОКИИ должно основываться на свидетельствах аудита, в качестве основных источников которых рекомендуется использовать:

– внутренние нормативные документы ОКИИ и, при необходимости, документы третьих лиц, относящиеся к обеспечению защищенности ОКИИ;

– устные высказывания сотрудников, ответственных за обеспечение ИБ в процессе проводимых опросов;

– результаты наблюдений за деятельностью сотрудников ОКИИ в области ИБ;

– соответствие описанных требований в нормативных документах положению дел на местах;

– настройки и функционирование средств защиты информации (СЗИ) на ОКИИ.

В процессе проведения опроса сотрудников, ответственных за обеспечение ИБ ОКИИ и наблюдений за деятельностью сотрудников ОКИИ проверяющие должны сделать вывод о степени соответствия оцениваемой деятельности требованиям внутренних нормативных документов ОКИИ, документов РФ по ИБ.

Этапы проведения оценивания уровня защищенности ОКИИ

1. Проведение осмотра ОКИИ, анализ документов по ИБ, их актуальность, достоверность, соответствие положений дел в ОКИИ требованиям документов по ИБ, опрос сотрудников ОИБ (сотрудника по ИБ) и аудит ИБ, оценивание и прогнозирование источников угроз ИБ, причин и условий, способствующих нанесению ущерба оператору и обладателю информации, нарушению нормального функционирования и развития ИТКС.

2. Составление вопросов по различным направлениям ИБ ОКИИ. Помимо нормативных источников по ИБ РФ дополнительно использовать в случае проведения аудиторской проверки внутреннего аудита организации работы ОИБ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации» утвержденную программу проверки, а при проведении самооценки защищенности ОКИИ (планового периодического контроля уровня защищенности) – рекомендации ФСТЭК России.

3. Определение КВ, используя метод относительного ранжирования, или руководствуясь требованиями, определенными для коэффициентов вышестоящей организацией.

4. Определение и формирование эталонных значений всех уровней защищенности ОКИИ методом лингвистических термов (определить термы для лингвистической переменной «Уровень защищенности»).

5. При проведении аудиторской проверки внутреннего аудита организации работы ОКИИ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации» провести опрос ОИБ (сотрудника по ИБ), в случае необходимости – специалистов других подразделений по подготовленным разделам ИБ. При проведении самооценки уровня защищенности ОКИИ (планового периодического контроля защищенности) ответить на вопросы разделов ИБ самостоятельно. Ответы давать в лингвистической или балльной форме в зависимости от выбранной модели оценивания уровня защищенности ОКИИ.

6. Определить суммарную оценку уровня защищенности ОКИИ (показателя уровня защищенности) и провести сравнение со всеми эталонными значениями уровней защищенности ОКИИ.

7. На основании результатов сравнения суммарной оценки уровня защищенности ОКИИ (показателя уровня защищенности) с эталонными значениями уровней защищенности ОКИИ определить уровень защищенности ОКИИ.

8. Проанализировать уровень защищенности ОКИИ.

Нечеткие модели оценивания уровня защищенности ОКИИ

1. Нечеткая модель оценивания уровня защищенности ОКИИ с использованием балльной шкалы.

ОИБ (сотрудник по ИБ) отвечает на предварительно ранжированные вопросы. Вопросы охватывают всю программу аудиторской проверки внутреннего аудита ОКИИ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации» и проранжированы по степени важности по *N*-балльной шкале.

По истечении определенного времени сотрудники, осуществляющие проверку, просматривают вопросы, варьируют диапазон шкалы ответов и рассчитывают КВ для каждого вопроса в зависимости от актуальности моделей угроз и технических каналов утечки информации (ТКУИ) ОКИИ, нормативных документов по ИБ. Далее осуществляют опрос сотрудников по ИБ. Пользователи в качестве ответов приводят балльные оценки из диапазона ответов.

На завершающей стадии определяют показатель уровня защищенности ОКИИ. Если распределение КВ по разделам различно, то необходимо предварительно определить значимость каждого раздела ИБ.

2. Нечеткая модель оценивания уровня защищенности ОКИИ с использованием лингвистической шкалы (НМЛШ).

Состояние защищенности ОКИИ в соответствии с НМЛШ определяют по результатам опроса сотрудников ОИБ (сотрудника по ИБ) согласно программе аудиторской проверки внутреннего аудита ОКИИ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации», разделы (вопросы) которой предварительно ранжируют через определение КВ. Для достижения этой цели используют метод ранжирования на основе преобразованной матрицы, полученной на основании матрицы парных сравнений (суждений) (табл. 2).

Таблица 2

Шкала для построения матрицы суждений

Оценка значимости	Качественная оценка	Примечание
1	Одинаковая значимость	Альтернативы имеют одинаковый ранг
3	Слабое преимущество	Преимущество одной альтернативы перед другой малоубедительное
5	Сильное преимущество	Есть надежные доказательства существенного преимущества одной альтернативы
7	Очевидное преимущество	Существуют убедительные свидетельства в пользу одной альтернативы
9	Абсолютное преимущество	Свидетельство в пользу преимущества одной альтернативы над другой с наибольшей мерой убедительности
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения	Используется, если необходим компромисс

Сотрудники, осуществляющие проверку, просматривают вопросы, рассчитывают КВ для каждого вопроса в зависимости от актуальности моделей угроз и ТКУИ ОКИИ, нормативных документов по ИБ.

Далее осуществляется опрос пользователей. Модель НМЛШ предполагает, что группа из *N* сотрудников ОИБ (сотрудник по ИБ) отвечает на *n* вопросов (*n*-компонентный экспертный запрос), соответственно составленных проверяющим сотрудником по нечеткой шкале.

На завершающей стадии определяют показатель уровня защищенности ОКИИ. Если распределение КВ по разделам различно, то необходимо определить значимость каждого раздела ИБ.

Кроме ранжирования разделов (вопросов) по степени важности, сотрудники, осуществляющие проверку, также строят нечеткие эталоны, которые отображают лингвистическую переменную «Уровень защищенности», являющуюся образцом для сравнения нечетких чисел, задают базовое терм-множество лингвистической переменной (ЛП), которое определяет уровень защищенности ОКИИ нечеткими термами, выбирают вид ФП, метод реализации операций нечеткой арифметики.

Представление и анализ полученных результатов оценивания уровня защищенности ОКИИ

После получения итоговых оценок уровня защищенности ОКИИ (итоговых и по разделам) выполняется анализ результатов.

Рекомендуется проводить сравнение результатов оценивания уровня защищенности ОКИИ, полученных при проведении самооценки и оценивания в результате проверки внутреннего аудита ОКИИ.

Полученные по результатам аудиторских проверок внутреннего аудита организации работы ОКИИ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации», самооценки защищенности (планового периодического контроля уровня защищенности на соответствие требованиям документов по ИБ), значение уровня защищенности ОКИИ должно соответствовать требованиям нормативных документов по ИБ и высокой (0,76-0,92) или очень высокой (0,93-1) оценке уровня защищенности ОКИИ.

Заключение

Возможное изменение внешней среды ведения деятельности ОКИИ, изменение и возрастание рисков ИБ вследствие естественных и/или преднамеренных изменений во внешней и внутренней среде ОКИИ является причиной для регулярного периодического проведения аудиторских проверок внутреннего аудита организации работы ОКИИ по направлению «Организация и состояние работы по защите информации» и самооценок уровня защищенности ОКИИ, что позволяет своевременно принимать меры по поддержанию защищенности ОКИИ на необходимом уровне. С помощью самооценки уровня защищенности ОКИИ самостоятельно оценивают соответствие защищенности ОКИИ критериям проверок и проводят анализ недостатков системы обеспечения защищенности ОКИИ.

Результаты самооценки уровня защищенности ОКИИ могут служить основанием для устранения выявленных недостатков системы обеспечения защищенности ОКИИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алгоритмическое и методическое обеспечение оценивания защищенности объектов критических инфраструктур: монография / В.М. Белов, А.А. Киселев, А.Б. Архипова, Т.М. Пестунова. — Москва: РУСАЙНС, 2025. — 190 с.

2. Белов В. М. Подход к оценке уровня информационной безопасности в территориальных налоговых органах / В. М. Белов, Е. Н. Пивкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20 : XX Междунар. науч. конф. : в 10 т. Т. 10. – Ростов-на-Дону, 2007. – С. 239–240.

3. Корченко А. Г. Построение систем защиты информации на нечетких множествах: теория и практические решения / А. Г. Корченко. – Киев: МК-Пресс, 2006. – 320 с.

4. Дойникова Е. В. Оценивание защищенности и выбор контрмер для управления кибербезопасностью: монография / Е. В. Дойникова, И. В. Котенко. – Санкт-Петербург: РАН, 2021. – 197 с.

5. Интеллектуальные сервисы защиты информации в крити-ческих инфраструктурах / И. В. Котенко, И. Б. Саенко, А. А. Чечулин [и др.]; под общ. ред. И. В. Котенко, И. Б. Саенко. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2019. – 400 с. – ISBN 978-5-9775-3968-5.

© А. А. Киселев, В. М. Белов, 2025

УДК 666.3
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-253-260

М. Б. Абилев[1], Д. Ерболат[1]✉, А. В. Троеглазова[2]

Фотолюминесцентные свойства диоксида циркония

[1]Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
[2] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: diaserbolat16@gmail.com

Аннотация. В статье исследованы фотолюминесцентные свойства нестабилизированного нанопорошка диоксида циркония (ZrO_{2-x}), полученного методом вакуумно-дугового синтеза, включая влияние кристаллической модификации и дефектов структуры на интенсивность и спектральные характеристики люминесценции. Особое внимание уделено механизмам излучения, связанным с кислородными вакансиями и примесными центрами. В исследовании проведен анализ влияния условий синтеза, включая давление газа и состав плазмообразующей среды, на морфологию, фазовый состав и люминесцентные свойства. Исследование ИК-спектра с оптической системой, помещенной в вакуумную камеру, исключает влияние атмосферной влаги на результаты и гарантирует высокую чувствительность в ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазоне. Показано, что контролируемое легирование и термическая обработка позволяют регулировать люминесцентные свойства ZrO_2 для применения в оптоэлектронике, сенсорах, маркерах и защитных покрытиях.

Ключевые слова: оксид циркония, фотолюминесценция, кислородные вакансии

M. B. Abilev[1], D. Yerbolat[1]✉, A. V. Troeglazova[2]

Photoluminescent properties of zirconium dioxide

[1] Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
[2]Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: diaserbolat16@gmail.com

Abstract. The article studies the photoluminescent properties of unstabilized zirconium dioxide nanopowder (ZrO_{2-x}) obtained by vacuum arc synthesis, including the effect of crystal modification and structural defects on the intensity and spectral characteristics of luminescence. Particular attention is paid to the emission mechanisms associated with oxygen vacancies and impurity centers. The study analyzes the effect of synthesis conditions, including gas pressure and composition of the plasma-forming medium, on the morphology, phase composition and luminescent properties. Studying the IR spectrum with an optical system placed in a vacuum chamber eliminates the effect of atmospheric moisture on the results and guarantees high sensitivity in the near, middle and far IR ranges. It is shown that controlled doping and heat treatment allow regulating the luminescent properties of ZrO_2 for use in optoelectronics, sensors, markers and protective coatings.

Keywords: zirconium oxide, photoluminescence, oxygen vacancies

Введение

Диоксид циркония (ZrO_2) является одним из наиболее востребованных функциональных материалов в современной науке и технике благодаря его вы-

сокой термической и химической стабильности, высокой диэлектрической проницаемости и способности к фазовым переходам [1]. Эти свойства делают ZrO_2 перспективным материалом для различных приложений, включая топливные элементы, сенсоры, катализаторы и электронику [2, 3]. Современные исследования сосредоточены на изучении наноструктурированных форм ZrO_2, поскольку наночастицы проявляют уникальные свойства, связанные с эффектами квантового размера, высокой удельной поверхностью и возможностью модификации структуры путем управления кислородными вакансиями [4, 5].

Фотолюминесцентные свойства оксида циркония вызывают значительный интерес в материаловедении благодаря уникальному сочетанию высокой химической и термической стабильности, широкой запрещенной зоны (~5 – 7 эВ) и возможности модификации свойств за счет легирования и создания дефектов. ZrO_2 существует в трех основных кристаллических модификациях – моноклинной (m- ZrO_2), тетрагональной (t- ZrO_2) и кубической (c- ZrO_2), каждая из которых может влиять на люминесцентные характеристики материала.

Ключевыми факторами, определяющими фотолюминесценцию ZrO_2, являются: кислородные вакансии – основные центры свечения в видимой области; легирование редкоземельными (Eu^{3+}, Tb^{3+}, Er^{3+}) и переходными металлами (Mn^{2+}, Cr^{3+}), что обеспечивает узкополосную люминесценцию в различных спектральных диапазонах; поверхностные эффекты и наноструктурирование – квантово-размерные явления и влияние границ зерен.

Применение люминесцентного ZrO_2 включает оптоэлектронику (подложки, светодиоды), биомедицинские маркеры и визуализацию, защитные метки и сенсоры.

Актуальные исследования в области фотолюминесценции ZrO_2 отражены в работе [6]. Результаты исследования механизмов люминесценции в чистом и легированном ZrO_2 с акцентом на влияние кислородных вакансий приведены в работе [7]. В работе [8] приведены результаты исследования и возможности контроля цвета свечения за счет введения Eu^{3+}, что может быть использовано при создании защитных меток. Исследовано влияние кристаллической фазы на люминесценцию при легировании Ti [9]. Существуют работы, посвященные исследованию возможности применения ZrO_2 в биовизуализации с ИК-люминесценцией [10]. Авторы [11] наблюдали эффекты усиления люминесценции Eu^{3+} за счет со-легирования Li^{+}. Исследователи [12] наблюдали эффекты механолюминесценции Mn^{2+}-легированного ZrO_2, которые могут быть применены для создания датчиков напряжения.

Данные работы демонстрируют, что фотолюминесценция ZrO_2 может быть эффективно управляемой за счет комбинации фазовых превращений, легирования и наноструктурирования. Однако остаются открытыми вопросы, связанные с повышением квантового выхода и стабильности люминесценции, что требует дальнейших исследований.

Целью данной работы является систематизация механизмов люминесценции ZrO_2 и оценка влияния методов синтеза, легирования и обработки на его оптические свойства.

Методы и материалы

Формирование наночастиц диоксида циркония (ZrO_2) в вакуумной камере при газофазном осаждении или плазменных методах синтеза проходит через несколько ключевых этапов, определяющих морфологию, размер и кристаллическую структуру образующихся частиц. На первом этапе испарение исходного материала, такого как металлический цирконий, приводит к образованию паровой фазы, которая вступает в реакцию с кислородом, инициируя процессы окисления и образования зародышей наночастиц. Важную роль играет среда, содержащая аргон и кислород, поскольку столкновения частиц в газовой фазе влияют на скорость зародышеобразования и дальнейший рост наночастиц. При оптимальных условиях формируются стабильные кристаллические фазы, среди которых доминируют моноклинная и тетрагональная формы ZrO_2, а их соотношение зависит от степени насыщения кислородом и скорости охлаждения частиц.

После стадии нуклеации начинается процесс коагуляции и роста наночастиц, во время которого отдельные зародыши сталкиваются, объединяются и стабилизируются. В зависимости от кинетики осаждения и концентрации газовой смеси частицы могут расти до определенного размера или, наоборот, оставаться в пределах нескольких нанометров, если условия не способствуют агломерации. Факторы, такие как плотность паров циркония, наличие кислорода и температура окружающей среды, определяют конечные свойства наночастиц, включая их размерный диапазон, степень кристалличности и возможные дефекты в структуре. В случае недостатка кислорода могут формироваться кислород-дефицитные наночастицы, содержащие вакансии, что приводит к изменению их электрофизических характеристик. Таким образом, контроль параметров синтеза позволяет управлять морфологией и фазовым составом наночастиц диоксида циркония.

Для синтеза наночастиц ZrO_2 использовалась вакуумная камера с установленным на боковой стенке плазменно-дуговым испарителем, подключенным к инверторному источнику питания, который обеспечивает ток дугового разряда 100 А. Экспериментальная установка и зависимость свойств порошка от условий распыления подробно обсуждаются в [13-14]. Катод диаметром 80 мм и длиной 100 мм состоял из циркониевого сплава чистотой 99,99% и был установлен на охлаждаемый водой медный токоввод. Размеры реакционной камеры – 0,6 м в диаметре и 0,6 м в высоту, с двойными стенками и фланцами из нержавеющей стали.

Оценка размера и формы получаемых частиц проводилась методом сканирующей электронной микроскопии на настольном электронном микроскопе Hitachi TM4000 Plus с системой энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) наночастиц ZrO_2 проводилась на электронном микроскопе высокого разрешения JEOL JEM-2100, работающем при ускоряющем напряжении 200 кВ.

ИК-спектральные исследования проводились на вакуумном Фурье-спектрометре Vertex 80V (Bruker) в диапазоне 5000 – 370 $см^{-1}$, со спектральным разрешением 0,2 $см^{-1}$.

Образцы были получены при давлении в вакуумной камере 90, 60 и 30 Па (обозначены в дальнейшем образец N90, N60, N30) с плазмообразующим газом аргоном. Содержание кислорода в газовой смеси для всех давлений составляло 20 %. Кислород подавался в реактор таким образом, чтобы образовать однородную оболочку вокруг плазменного факела. Реактор предварительно вакуумировали до базового давления 10^{-3} Па. Продукты реакции собирали в течение 20 минут на полусферическом коллекторе из нержавеющей стали с водяным охлаждением, расположенном на расстоянии 200 мм от катода.

Результаты исследования и их обсуждение

SEM, HRTEM анализ. Морфология синтезированных образцов представлена на рис. 1, рис. 2. На рис. 1 изображена СЭМ микрофотография образца N60. Для образцов N90 и N30 принципиальных отличий не наблюдается, и нанопорошки выглядят аналогично.

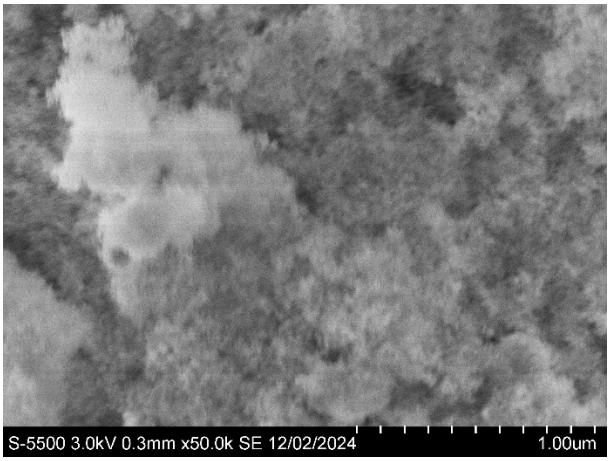
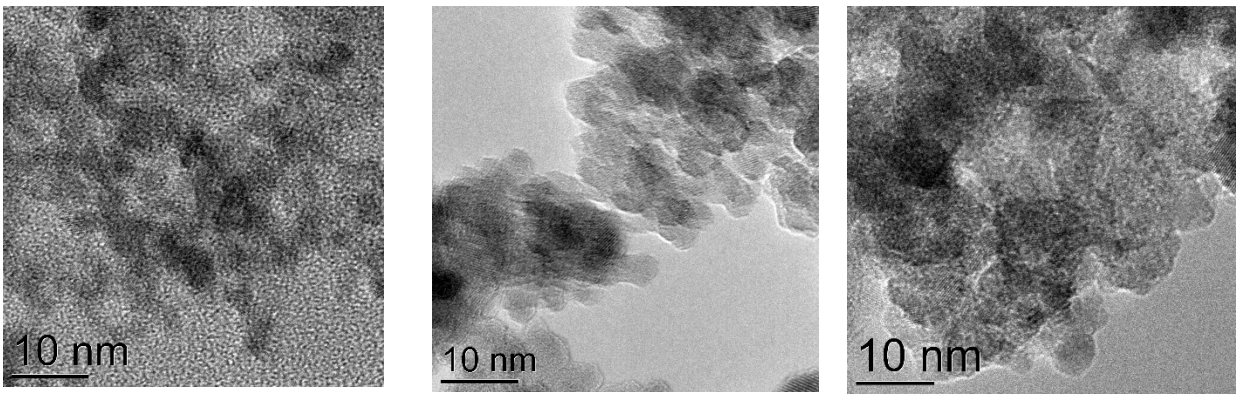


Рис. 1. Микрофотография образца ZrO_{2-x} полученного при давлении газовой смеси 60 Па (Sample N60)

На рис. 2 приведены снимки высокоразрешающей просвечивающей микроскопии наночастиц ZrO_2, полученных при различных давлениях газовой смеси (90, 60 и 30 Па). Как следует из полученных результатов, нанопорошок ZrO_2 представляет собой сильно агломерированные частицы сферической формы. Размеры частиц варьируются в диапазоне от 2 до 12 нм. Во всем диапазоне давлений для частиц характерно смешанное нормальное и логарифмически нормальное распределение по размерам. Это говорит о двух конкурирующих механизмах конденсации частиц из пароплазменной фазы: кластерной и паровой [15].



Sample N30 Sample N60 Sample N90

Рис. 2. ТЕМ изображение указанных образцов
кислороддефицитного диоксида циркония ZrO_{2-x}

Основной причиной роста частиц при повышении давления является изменение условий нуклеации и коагуляции в плазме дугового разряда. При низких давлениях (30 Па) концентрация частиц в зоне образования ниже, что приводит к быстрому охлаждению частиц и меньшему размеру. С увеличением давления (60 – 90 Па) плотность паров материала возрастает, что способствует увеличению времени пребывания частиц в плазменной зоне и их укрупнению за счет коалесценции и агломерации. Это также может быть связано с изменением скорости охлаждения частиц и повышенной вероятностью столкновений, что приводит к их росту. В результате, давление в камере является ключевым параметром, определяющим морфологию получаемых наночастиц диоксида циркония, что имеет важное значение для контроля их свойств при синтезе.

FT-IR анализ. FTIR-спектры трех образцов (N30, N60 и N90) нанопорошка диоксида циркония, показанные на рисунке, проявляют характерные полосы группирования, соответствующие различным структурным модификациям ZrO_2 и возможным примесным соединениям, рис. 3.

Область 3500 – 3000 см$^{-1}$. В указанном диапазоне волновых чисел наблюдаются широкие полосы, которые можно связать с валентными колебаниями О–Н групп. Это может свидетельствовать о наличии гидроксильных OH^- групп на поверхности частиц, что характерно для наноматериалов, подвергшихся адсорбции влаги.

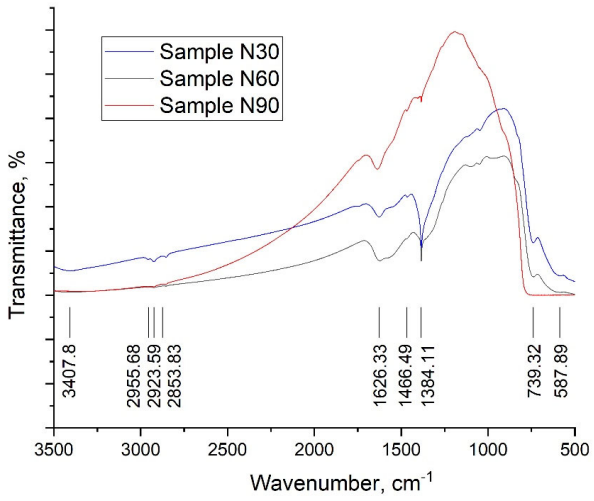


Рис. 3. Фурье-спектры инфракрасной спектроскопии (FTIR) наночастиц ZrO_{2-x}, полученные при различном давлении газовой смеси

В области 1700 – 1300 **см$^{-1}$** в FTIR-спектрах нанопорошков диоксида циркония наблюдаются полосы, которые могут быть связаны с деформационными колебаниями молекул воды (δ(O–H)). Эти колебания характерны для воды, находящейся в физически адсорбированном или химически связанном состоянии на поверхности наночастиц. Деформационные колебания воды возникают при изменении угла связи H–O–H и обычно сопровождаются более интенсивными полосами в области 3200 – 3500 **см$^{-1}$,** характерными для валентных колебаний O–H групп. В представленных спектрах интенсивность полос в диапазоне 1700 – 1600 **см$^{-1}$** наиболее выражена в образцах N30 и N60, что свидетельствует о более высокой степени гидратации их поверхности. Это может быть связано с наличием гидроксильных групп (Zr–OH), способствующих удержанию молекул воды, а также с пористой структурой нанопорошка, обеспечивающей эффективную адсорбцию влаги. В образце N90 интенсивность этой полосы значительно ниже, что может свидетельствовать о меньшем количестве поверхностно связанных молекул воды или более плотной упаковке наночастиц, препятствующей адсорбции. Таким образом, анализ данной полосы позволяет оценить уровень гидратации поверхности частиц, их способность к водопоглощению и взаимодействие с окружающей средой.

Область 800 – 500 см$^{-1}$. Основные полосы соответствуют колебаниям связей Zr–O в различных фазах диоксида циркония. Для всех образцов наблюдаются пики размером 500 – 750 **см$^{-1}$**, которые характерны для тетрагональной и моноклинной фаз ZrO_2. В образце N30, содержащем 90 % тетрагональной модификации, представлены наиболее высокие полосы, что подтверждается строгим пониманием тетрагональной структуры. В образце N90, где тетрагональная фаза снижена до 52 %, наблюдается ослабление характерных полос, и возможно появление новых сигналов, указывающих на частичное появление оксида в моно-

клинной форме. Образец N60 (75 % тетрагональной фазы и 15 % Zr_3O) состоит из усиленных полос в области 600–650 **см$^{-1}$**, что может быть связано с присутствием кислород-дефицитных соединений Zr_3O и явлениями, связанными с наличием кислородных вакансий.

Таким образом, анализ FTIR-спектров, подтвержденный фазовым составом образцов, выявляет наличие гидроксильных и карбонатных групп на поверхности наночастиц, а также указывает на возможные структурные дефекты и кислородные образования, особенно в образцах с высоким содержанием Zr_3O.

Заключение

Проведенное исследование показало, что вакуумно-дуговой метод синтеза позволяет получать нестабилизированные нанопорошки диоксида циркония (ZrO_{2-x}) с регулируемыми структурными и электрическими характеристиками. Выявлено, что кислородные вакансии играют ключевую роль в формировании функциональных групп и химических связей, кислородные дефекты и вакансии, люминесцентных свойств порошков и поляризационные свойства. С использованием люминесцентной спектроскопии методом FTIR-анализа установлено влияние примесей и дефектов, что позволяет оптимизировать синтез ZrO_{2-x} для заданных применений (люминофоры, сенсоры, биомаркеры). Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшей оптимизации свойств ZrO_{2-x} и его применения в электрохимических устройствах, сенсорах и энергоэффективных системах. Будущие исследования должны быть направлены на детальное изучение механизмов переноса заряда в данных материалах и их устойчивости в различных эксплуатационных условиях.

Благодарности

Исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP19677974.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kumari N., Sareen S., Verma M., Sharma S., Sharma A., Sohal H.S., Mehta S.K., Park J., Mutreja V. Zirconia-based nanomaterials: recent developments in synthesis and applications Nanoscale Adv.– 2022.– 4.– 4210-4236. doi: 10.1039/D2NA00367H.

2. Zhang J., Sun H., Shu L., Huang L., Wang B., Lu Q., Yan D., Liang X., Liu F., Lu G. Fabrication of YSZ ceramic thin films with sol-gel method for mixed potential-type zirconia-based NO_2 sensor, Ceramics International.– Vol. 50.– Is. 7.– Part A.– 2024.– P. 10698-10705.

3. Antunes F.C., J.P.J. de Oliveira, Verza J.R., Cesar R., Morelli M.R., Dias T., J.P.A. dos Santos, Doubek G., Hunt J.D., Zanin H., Boosting ionic conductivity of Y_2O_3 co-doped ZrO_2 – CeO_2 electrolyte of SOFCs by successive thermal-treatments, Ceramics International.– Vol. 51.– Is. 5.– 2025.– P. 6815-6823.

4. Islamov D.R., Gritsenko V.A., Perevalov T.V., V.Sh. Aliev, Nadolinny V.A., Chin A., Oxygen vacancies in zirconium oxide as the blue luminescence centres and traps responsible for charge transport: Part II-Films, Materialia.– Vol. 15.– 2021.– 100980.

5. Y. Garanin, R. Shakirzyanov, D. Borgekov, et al. Study of morphology, phase composition, optical properties, and thermal stability of hydrothermal zirconium dioxide synthesized at low temperatures. Sci Rep 14.– 29398 (2024).

6. Kumar, S., et al. (2020) «Defect-mediated luminescence in pure and doped zirconia: Role of oxygen vacancies and rare-earth ions» Journal of Luminescence, 225, 117–128.

7. Wang, L., et al. (2019) «Tunable photoluminescence of ZrO_2:Eu^{3+} nanoparticles for anti-counterfeiting applications» ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(34), 31298–31306.

8. García-Murillo, A., et al. (2018) «Effect of crystal structure on the photoluminescence properties of ZrO_2:Ti nanocrystals» Materials Chemistry and Physics*, 207, 214–220.

9. Li, Y., et al. (2021) «Near-infrared luminescence of ZrO_2:Yb^{3+}/Er^{3+} for bioimaging» Ceramics International, 47(5), 6785–6792.

10. Shi, J., et al. (2017) «Enhanced red emission from ZrO_2:Eu^{3+} by codoping with Li^+ ions» Optical Materials, 73, 744–749.

11. Chen, D., et al. (2022) «Mechanoluminescent ZrO_2:Mn^{2+} for stress sensing in composites» Advanced Functional Materials, 32(15), 2108765.

12. Smits, K., et al. (2016) «Intrinsic defect-related luminescence in ZrO_2» Journal of Physics D: Applied Physics, 49(31), 315502.

13. Karpov I.V., Fedorov L.Yu., Abkaryan A.K., Zharkov S.M., Molokeev M.S., Ivanenko A.A., Nemtsev I.V., Irtyugo L.A. Resistive switching properties of a nanostructured layer of mixed ZrO_2 phases obtained in low-pressure arc discharge plasma // Vacuum. 2024.– Vol. 227.– 113375. doi: 10.1016/j.vacuum.2024.113375.

14. Uschakov A.V., Karpov I.V., Lepeshev A.A., Petrov M.I., Plasma-chemical synthesis of copper oxide nanoparticles in a low-pressure arc discharge, Vacuum 133 (2016) 25-30.

15. Karpov I.V., Ushakov A.V., Lepeshev A.A., L.Yu Fedorov, Plasma-chemical reactor based on a low-pressure pulsed arc discharge for synthesis of nanopowders, Tech. Phys. 62 (2017) 168-173.

© М. Б. Абилев, Д. Ерболат, А. В. Троеглазова, 2025

УДК 537.5
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-261-271

Н. В. Прохоренкова[1], А. М. Жилкашинова[1]✉, А. В. Троеглазова[2]

Вакуумные технологии нанесения радиопоглощающих покрытий

[1]Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
[2] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: almira_1981@mail.ru

Аннотация. Радиопоглощающие покрытия (РПП) играют ключевую роль в снижении радиолокационной заметности объектов и применяются в авиации, судостроении и телекоммуникациях, а также, при решении задач защиты информации, путем создания «электрических подписей» с использованием наноструктурированных покрытий, использования тонких пленок в метках для защиты от подделки, создания электронных меток и ключей шифрования и т.д. Вакуумные методы нанесения таких покрытий обеспечивают высокую точность, однородность и адгезию, что критически важно для их эффективности. Магнетронное распыление позволяет создавать многослойные наноструктурированные покрытия с контролируемым составом (например, на основе карбидов, нитридов или оксидов металлов). Преимущества вакуумных методов нанесения РПП заключаются в возможности контроля толщины и состава покрытия на наноуровне, достижении высокой адгезия и стойкости к агрессивным средам, возможности нанесения на сложные и миниатюрные поверхности. Вакуумные технологии обеспечивают воспроизводимость и высокое качество радиопоглощающих покрытий, что делает их незаменимыми для современных стелс-решений. В данной работе рассматривается метод магнетронного напыления покрытий на основе Co, C и Cr для формирования четырехслойных структур с радиопоглощающими свойствами. В качестве подложки для нанесения покрытий использовали тонкие пластины нелегированного монокристаллического кремния (Si). Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию многослойных структур и внедрение новых композитных материалов.

Ключевые слова: многослойное покрытие, радиопоглощающие покрытия, магнетронное напыление, потери на отражение, адгезия

N. V. Prohorenkova[1], A. M. Zhilkashinova[1]✉, A. V. Troeglazova[2]

Vacuum technologies for applying radio-absorbing coatings

[1] Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
[2]Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: almira_1981@mail.ru

Abstract. Radio-absorbing coatings (RAC) play a key role in reducing the radar visibility of objects, being used in aviation, shipbuilding and telecommunications, as well as in solving information security problems by creating "electrical signatures" using nanostructured coatings, using thin films in tags to protect against counterfeiting, creating electronic tags and encryption keys, etc. Vacuum methods of applying such coatings provide high accuracy, homogeneity and adhesion, which is critically important for their effectiveness. Magnetron sputtering allows creating multilayer nanostructured coatings with a controlled composition (for example, based on carbides, nitrides or metal oxides). The advantages of vacuum methods of RAC application are the ability to control the thickness and

composition of the coating at the nanolevel, achieving high adhesion and resistance to aggressive environments, the ability to apply to complex and miniature surfaces. Vacuum technologies provide reproducibility and high quality of radio-absorbing coatings, which makes them indispensable for modern stealth solutions. This paper considers the method of magnetron sputtering of coatings based on Co, C and Cr to form four-layer structures with radio-absorbing properties. Thin plates of undoped monocrystalline silicon (Si) were used as a substrate for applying the coatings. Further research can be aimed at optimizing multilayer structures and introducing new composite materials.

Keywords: multilayer coating, radio-absorbing coatings, magnetron sputtering, reflection losses, adhesion

Введение

Вакуумное напыление радиопоглощающих покрытий (РПП) – это технология нанесения тонких слоев материалов, которые уменьшают отражение и рассеивание электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне [1]. К основным сферам применения РПП относятся стелс-технологии, поглотители электромагнитных помех в электронных устройствах, антенные технологии (уменьшение паразитного излучения) [2]. Из всех существующих методов нанесения металлических, диэлектрических и композитных слоев для создания РПП используют методы магнетронного распыления, ионно-плазменного напыления, электронно-лучевого испарения и молекулярно-лучевой эпитаксии. У каждого из указанных методов есть свои преимущества и недостатки, с учетом которых и определяется область применения метода. Так, например, ионно-плазменное напыление позволяет наносить материалы с высокой температурой плавления (карбиды, нитриды) [3], электронно-лучевое испарение подходит для тугоплавких материалов (графен, углеродные наноструктуры) [4], а молекулярно-лучевая эпитаксия используется для сверхточного нанесения ультратонких слоев [5]. Метод магнетронного распыления позволяет контролировать состав и структуру покрытия, применяется для создания многослойных поглощающих структур (например, чередование проводящих и диэлектрических слоев) [6-8].

Рассмотрим подробнее методы магнетронного напыления. В качестве материалов для создания радиопоглощающих покрытий используют углеродные материалы (графен, углеродные нанотрубки, сажа), которые обеспечивают широкополосное поглощение [9-10]. Также широкое применение находят ферромагнетики (ферриты, пермаллой), такие материалы эффективны в СВЧ-диапазоне [11-12]. При создании многослойных структур используют диэлектрики с потерями (оксиды, нитриды) [13]. К перспективным направлениям исследований в данной области также можно отнести создание метаматериалов, представляющих собой искусственные структуры с отрицательным коэффициентом преломления [14], гибкие и самовосстанавливающиеся покрытия для космических аппаратов [15].

Магнетронное напыление (магнетронное распыление, англ. «Magnetron Sputtering») это один из наиболее распространенных методов вакуумного осаждения тонких пленок, широко применяемый для нанесения РПП [16]. Техноло-

гия обеспечивает высокую скорость осаждения, хорошую адгезию и контроль состава покрытия.

В качестве материалов для получения радиопоглощающих покрытий применяют металлы и сплавы: никель (Ni), железо (Fe), кобальт (Co) – ферромагнитные свойства, поглощение в СВЧ-диапазоне. Алюминий (Al), медь (Cu) – в сочетании с диэлектриками создают интерференционные структуры. Графен, углеродные нанотрубки (УНТ) – широкополосное поглощение. Ферриты (Ni-Zn, Mn-Zn) – магнитные потери в радиочастотах. SiC, TiN, ZnO – полупроводниковые поглотители [17].

В настоящее время, в связи с ростом числа производителей электронной техники, развитием искусственного интеллекта и интернета-вещей, очень актуальной становится задача защиты информации путем создания «электрических подписей» с использованием наноструктурированных покрытий, использование тонких пленок в метках для защиты от подделки, создание электронных меток и ключей шифрования и т.д. Наиболее перспективным направлением в этой области является получение многослойных структур, так как такая технология позволяет точно настраивать радиопоглощающие свойства под конкретные задачи, а сам процесс не требует дорогостоящего оборудования. Примерами таких многослойных структур радиопоглощающих покрытий являются интерференционные покрытия – чередование металл/диэлектрик (например, Al/SiO_2) работает за счет деструктивной интерференции отраженных волн, или градиентные покрытия – постепенное изменение импеданса (например, от проводящего к диэлектрическому слою). Целью настоящего исследование является расчет радиопоглощающих характеристик и проектирование многослойного радиопоглощающего покрытия на основе Co-C-Cr.

Методы и материалы

В качестве подложки для нанесения покрытий использовали тонкие пластины нелегированного монокристаллического кремния (Si) толщиной 20 мкм (для минимизации влияния подложки на электромагнитные свойства покрытия) с кристаллографической ориентацией (100). Использование данного вида кремния в качестве подложки позволяет избегать «паразитных» проводящих путей, которые могут искажать результаты исследований радиопоглощения. Создание покрытий Co-Cr-C осуществлялось методом магнетронного распыления на приборе ЭПОС PVD-440 в режиме постоянного тока в инертной среде аргона путем распыления ферромагнитных Co, Cr мишеней и мишени C на кремниевую подложку. Толщина слоев регулировалась временем напыления. Подложка из пористого кремния помещалась в геометрическом фокусе магнетронов на расстоянии 15 см. Перед напылением подложка очищалась источником ионов Ar^+ с ускоряющим напряжением 3,5 кВ в течение 30 мин. Концентрация составляющих элементов в покрытии регулировалась мощностью, подводимой к мишеням Co/C/Cr.

Толщину покрытия определяли методом сканирующей электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL -2200

FS (JEOL, Япония) с приставкой энергодисперсионного анализа (EDX) INCA ENERGY (Oxford Instruments, Великобритания). Ускоряющее напряжение до 30 кВ; разрешение до 3 нм; приборное увеличение до х300 000. Образцы проб помещались в форму диаметром 30 мм, заливались эпоксидным наполнителем и сушились. Определение толщины покрытия осуществлялись на поперечном срезе, для пробоподготовки поперечного среза использовали метод механического среза под углом алмазным резаком с последующим полированием дисками с уменьшающейся зернистостью (0,5 мкм, 0,05 мкм). После механической подготовки проходила ультразвуковая очистка в изопропиловом спирте с последующей сушкой и ионным травлением Ar^+ в магнетроне для улучшения качества поверхности среза.

Микротвердость синтезированной керамики определяли по методу Виккерса с использованием микротвердомера DuraScan-20 (EMCO TEST, Австрия), испытательная нагрузка 0,2; 0,5 и 1,0 кН, выдержка при максимальной нагрузке – 5 с.

Усилие сцепления покрытия с подложкой оценивали по авторской методике, основанной на требованиях ГОСТ 24409-80 «Материалы керамические электротехнические» с использованием универсальной электромеханической испытательной машины РКМ 10.2/10.2 svo.

Анализ микроструктуры экспериментальных образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа The Thermo Scientific Phenom XL G2 Desktop SEM. Максимальное увеличение ×100 000; разрешение 14 нм; ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ, детектор обратно рассеянных электронов, ЭДС-приставка.

Результаты исследования и их обсуждение

Радиопоглощающее покрытие Co-C-Cr (кобальт-углерод-хром) – это тип покрытия, который относится к «магнитодиэлектрическим композитам», сочетающим ферромагнитные (Co, Cr) и диэлектрические (углерод) компоненты. Он эффективно поглощает электромагнитные волны за счет магнитных потерь (Co) и диэлектрических потерь (углерод), а хром (Cr) улучшает адгезию и коррозионную стойкость. В табл. 1 приведены основные свойства применяемых при создании многослойного покрытия химических элементов.

Таблица 1

Компоненты многослойного покрытия и их роль

№	Компонент	Тип материала	Роль в покрытии
1	Кобальт (Co)	Ферромагнетик	Обеспечивает магнитные потери (гистерезис, резонансное поглощение).
2	Углерод (C)	Диэлектрик / полупроводник	Дает диэлектрические потери (поляризационные механизмы). Может быть в виде аморфного углерода (a-C), графена/нанотрубок, карбидов (Cr_3C_2).
3	Хром (Cr)	Металл-связка	Улучшает адгезию к подложке, предотвращает окисление кобальта.

В результате эксперимента получено четырехслойное покрытие Co-C-Cr-Co, с толщиной слоев около 1 мкм, рис. 1. На рисунке представлена структура и фазовый состав четырехслойного покрытия, включающего последовательные слои Co-C-Cr-Co. На рис. 1а представлено изображение BF-TEM, которое демонстрирует четкую многослойную структуру, состоящую из четырех контрастных слоев, каждый толщиной около 1 мкм. Границы между слоями четко выражены, что свидетельствует о стабильности осаждения и отсутствии значительной межслойной диффузии.

На рис. 1б показана STEM-EDS карта распределения элементов, которая отображает пространственное распределение основных элементов: Co, Cr и C. Видна строгая локализация каждого элемента в соответствующем слое, что подтверждает успешное формирование целевых композиций без значительного перемешивания.

На рис.1в показан рентгенофазовый анализ и наличие дифракционных пиков, соответствующих кристаллическим фазам Co и Cr, что указывает на нанокристаллическое состояние металлических слоев. Также не наблюдаются пики оксидов или других соединений, что подтверждает чистоту покрытия и отсутствие заметного окисления. Пик кремния соответствует материалу подложки, представляющей собой кремниевую пластину.

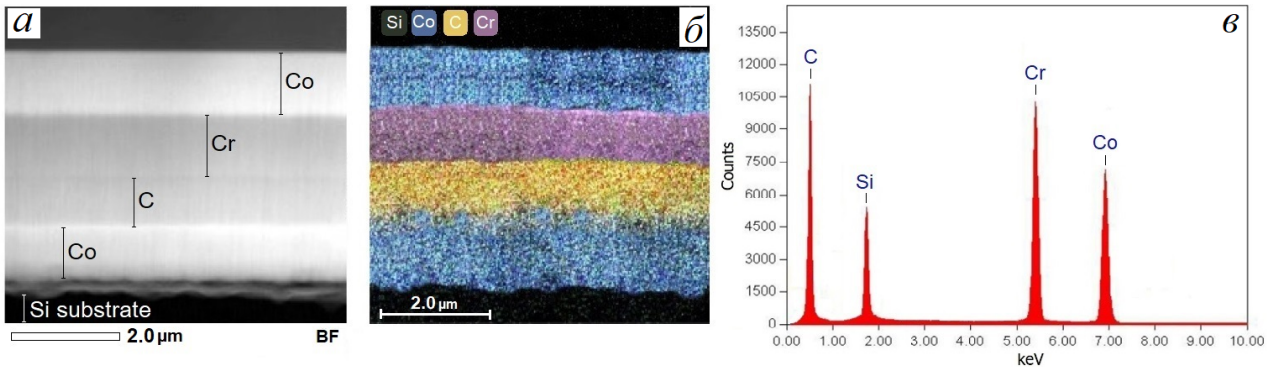


Рис. 1. Структура четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co

СЭМ исследование поверхностных слоев, после каждого цикла напыления покрытия указывает на наличие его нанокомпозитной структуры. На рис. 2 приведено типичное изображение микроструктуры покрытия, которое имеет идентичный характер для всех компонентов слоев.

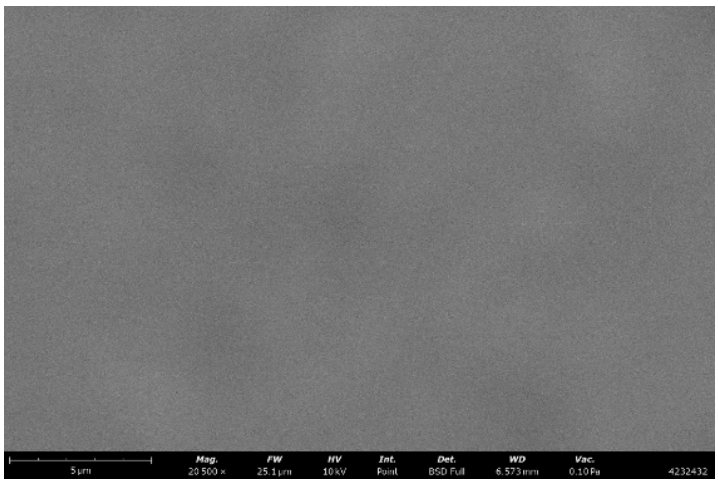


Рис. 2. СЭМ изображение микроструктуры поверхности покрытия Co

Из рис. 2 следует, что микрокристаллиты, формирующиеся в процессе вакуумного напыления, имеют размеры менее 100 нм. Структура представляет собой упорядоченные кристаллические решетки.

Механизмами поглощения электромагнитных волн в таком покрытии являются магнитные потери (Co) и его гистерезисные потери в переменном магнитном поле. Известно о проявлении ферромагнитного резонанса на частотах 2–18 ГГц для наночастиц Co [18]. Углерод (C) вносит диэлектрические и поляризационные потери (электронная и ионная поляризация). При наличии графитовых кластеров возникает проводимость аморфного углерода. В многослойных структурах происходит гашение отраженной волны.

Проведена оценка механических и эксплуатационные свойств полученного многослойного покрытия Co-C-Cr-Co. Результаты измерения микротвердости по диагонали подложки указывают на значение 8 – 10 ГПа, что является отличным показателем.

Для определения прочности сцепления покрытия с подложкой на поверхность покрытия припаивали серебряные штырьки, паяные образцы закрепляли в приспособлении на разрывной машине и при помощи захвата прикладывали нагрузку на вывод до его отрыва. Значение прочности сцепления покрытия с подложкой определяли по значению показаний динамометра разрывной машины, при котором произошел отрыв вывода от покрытия. Также, помимо прочности сцепления покрытия с подложкой, производили оценку характера отрыва, для этого к покрытию припаивали никелевую пластину толщиной 0,1 мм и при помощи пинцета отрывали ее от поверхности подложки, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Фотография металлизированной подложки и припаянного никелевого вывода в процессе его отрыва от подложки

По результатам измерения прочности сцепления покрытия с подложкой, адгезия составляет > 50 МПа, по-видимому такое высокое значение адгезии достигается за счет присутствия хрома.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента отражения S11 в логарифмической шкале (LogMag) от частоты в диапазоне 8,2 – 12,4 ГГц. Коэффициент S11 (LogMag) выражается в децибелах (dB) и показывает уровень отражения сигнала. При этом, чем ниже значение, тем меньше отражение и лучше поглощение электромагнитной энергии. Если S11 > –3 дБ, то отражается более 50% энергии, а если S11 < –10 дБ, то поглощается более 90% энергии, что является хорошим показателем. График для четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co демонстрирует следующие минимумы коэффициента отражения (наилучшее поглощение): 8,4 ГГц, что говорит о том, что около 70% энергии поглощается покрытием; следующий минимум при 9,6 ГГц соответствует поглощению около 75%; около 10,5 ГГц соответствует поглощению 80%; последний наблюдаемый минимум около 11,8 ГГц говорит о достаточно хорошем поглощении.

При этом наблюдаются максимумы коэффициента отражения (низкий уровень поглощения) в диапазонах 8,2-8,5 ГГц и 9-9,2 ГГц, выше –3 дБ, что говорит о том, что более 50% энергии отражается обратно. График данного четырехслойного покрытия демонстрирует узкополосное поглощение, так как коэффициент S11 достигает значительных минимумов только в отдельных точках. Между этими частотами поглощение ухудшается (S11 повышается), что говорит о недостаточном согласовании слоев и резонансном характере работы покрытия.

Механизм поглощения электромагнитных волн в покрытии Co-C-Cr-Co происходит за счет комбинации «магнитных», «диэлектрических» и «резистивных потерь», а также интерференционных эффектов. Рассмотрим каждый механизм детально.

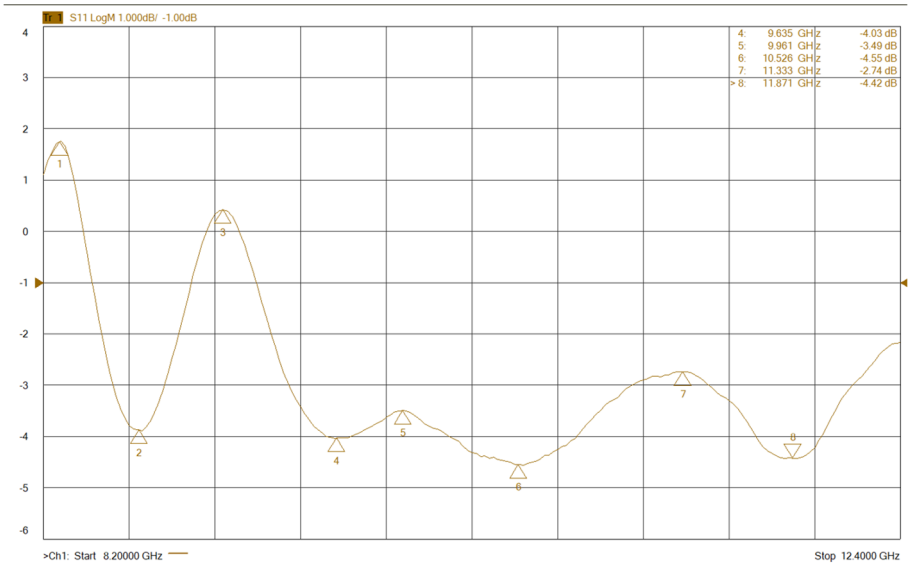


Рис. 4. Потери на отражение (S11 LogMag)
четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co

Магнитные потери (доминирующий вклад кобальта). Кобальт (Co) – ферромагнетик с высокой коэрцитивной силой. При воздействии переменного магнитного поля его домены перемагничиваются, но с запаздыванием (гистерезис). Энергетические потери оцениваются работой, затрачиваемой на перемагничивание, которая преобразуется в тепло:

$$W_{\text{ГИСТ}} = \int \mu_0 H dM$$

где (M) – намагниченность, μ_0 – магнитная постоянная.

В зависимости от частоты в диапазоне 8 – 12 ГГц гистерезисные потери максимальны из-за высокой скорости изменения поля.

Наблюдаемые пики возникают, возможно, по причине ферромагнитного резонанса при условии, когда резонансная частота внешнего поля совпадает с частотой прецессии спинов в Co:

$$f_{\text{рез}} = \gamma \cdot H_{\text{эфф}}$$

где γ – гиромагнитное отношение, $H_{\text{эфф}}$ – эффективное поле (включает анизотропию и размагничивающие поля). Для наночастиц Co резонанс наблюдается в диапазоне 8 – 12 ГГц.

Углерод, в свою очередь, вносит вклад в диэлектрические потери, происходит электронная поляризация – смещение электронных облаков в углеродных кластерах (sp^2-гибридизация) под действием поля $E(t)$. При наличии связей C-Cr или C-Co, где легкие ионы углерода смещаются относительно тяжелых металлов, возможно возникновение ионной поляризации. В аморфном углероде (a-C) есть дипольные моменты, которые переориентируются с запаздыванием:

$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

где ε″ – мнимая часть диэлектрической проницаемости. Если углерод содержит графитовые домены, также возникают джоулевы потери, а при содержании углерода >15% могут образовываться проводящие пути, усиливая поглощение.

Присутствие Cr предотвращает окисление Co и формирует карбиды (Cr_3C_2), которые повышают твердость. Cr имеет промежуточное волновое сопротивление между Co и C, снижая отражение от границы раздела.

Так как наше покрытие состоит из чередующихся слоев Co-Cr-C и Co, то происходит деструктивная интерференция, т.е. волны, отраженные от разных границ, гасят друг друга, при условии минимума отражения:

$$2d\sqrt{\varepsilon\mu} = \frac{\lambda}{2},$$

где d – толщина слоя; λ – длина волны.

При многократном отражении электромагнитная волна затухает при прохождении через слои с разным ε и μ. В диапазоне низких частот, до 9 ГГц, доминирующим механизмом являются гистерезисные потери Co, в многослойном покрытии происходит перемагничивание крупных доменов. С увеличением частоты электромагнитного поля до 12 ГГц наступает ферромагнитный резонанс Co и поляризация углерода C, в многослойном покрытии происходит резонанс наночастиц Co и дипольная релаксация, что, в целом, приводит к резонансному характеру работы покрытия в исследуемом диапазоне частот.

Заключение

Полученное четырехслойное покрытие Co-C-Cr-Co характеризуется многослойной структурой с четким разделением по составу и комбинированным структурно-фазовым состоянием. Металлические слои (Cr и Co) находятся в нанокристаллическом состоянии с возможной текстурой в поверхностных участках. Межфазные границы – четкие и стабильные, без признаков диффузии и образования интерметаллических фаз. Создана структура с чередованием аморфных и кристаллических фаз, резкие границы между слоями усиливают рассеяние и поглощение электромагнитных волн. По результатам исследования, вакуумные методы нанесения таких покрытий обеспечивают высокую точность, однородность и адгезию на уровне 50 МПа, что критически важно для их эффективности.

Исследование поглощающих характеристик четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co демонстрирует следующие минимумы коэффициента отражения (наилучшее поглощение): 8,4 ГГц, что говорит о том, что около 70% энергии поглощается покрытием; следующий минимум при 9,6 ГГц соответствует поглощению около 75%; около 10,5 ГГц соответствует поглощению 80%; наблюдаемый минимум около 11,8 ГГц говорит о достаточно хорошем поглощении. Таким

образом, при проектировании радиопоглощающих многослойных покрытий ключевую роль играют магнитные потери Co (гистерезис), диэлектрические потери C (поляризация и проводимость), синергия Cr (импедансное согласование и защита от окисления).

Согласно проведенным исследованиям, данные материалы можно применять в системах, где необходимо подавлять отражение на определенных частотах (например, в многодиапазонных радиочастотных экранах или устройствах подавления помех), для решения задач защиты информации, путем создания «электрических подписей» с использованием наноструктурированных покрытий, при создании электронных меток и ключей шифрования и т.д.

По результатам исследования выявлено, что для получения эффективных радиопоглощающих покрытий такого рода ключевое значение имеют: подбор состава и структуры, обеспечивающей электромагнитные потери; контроль фазового состояния и морфологии; оптимизация толщины и архитектуры слоев. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят создавать более легкие, тонкие и эффективные материалы для радиопоглощения в широком частотном диапазоне.

Благодарности

Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP19680101.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров В., Николайчук Г., Яковлев С., Луцев Л. «Исследование радиопоглощающих свойств материалов на основе наноструктур». Компоненты и технологии № 12.– 2008. С. 141 – 146.

2. Казанцева, Н. Е. Перспективные материалы для поглотителей волн сверхвысокочастотного диапазона / Н. Е. Казанцева, Н. Г. Рывкина, И. А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 2. – С. 196–209.

3. Дринберг А.С. «Влияние электромагнитного излучения на различные материалы и покрытия (обзор)» Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). № 38(64).– 2017. С. 19-24.

4. Иванов А., Смирнов Б. «Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование». Промышленные нанотехнологии. НаноИндустрия.– №6.– 36. 2012.– С. 28 – 34.

5. Шенгуров В.Г., Денисов С.А., Чалков В.Ю. (сост.) Молекулярно-лучевая эпитаксия кремния и кремний-германия: Учебно-методический комплекс.– ННГУ 2010. – С. 37 – 43.

6. Mattox, D. M. «Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing». Elsevier. – 2010. – 15p.

7. Wang, L. et al. «Magnetron sputtered graphene-based composites for microwave absorption» // Carbon. – 2021. – Vol.7. – P 1-24.

8. US Patent 9.874.567 – «Multilayer radar-absorbing coating deposited by magnetron sputtering».

9. Liu X. et al. «Broadband microwave absorption of Fe/C nanocapsules» // J. Appl. Phys. – 2010. Vol. 95. – Ed.2. – P. 23114.

10. Lutsev L. V., Kazantseva N. E., Tchmutin I. A., Ryvkina N. G., Kalinin Y. E., Sitnikoff A. V. Dielectric and magnetic losses of microwave electromagnetic radiation in granular structures with ferromagnetic nanoparticles // J. Phys.: Condensed Matter. – 2003. Vol. 15. No. 22. – P. 3665–3681.

11. Луцев Л. В. Спиновые возбуждения в гранулированных структурах с ферромагнитными наночастицами // ФТ. – 2002. – № 44 (1) . – С. 97 – 105.

12. Lutsev L. V., Yakovlev S. V., Siklitsky V. I., Zvonareva T. K. Microwave properties of amorphous carbon structures with ferromagnetic Co nanoparticles // Abstracts of Invited Lectures & Contributed Papers, 6th Biennial International Workshop «Fullerenes and Atomic Clusters», IWFAC'2003, St. Petersburg, June 30, July 4. –2003. – P. 1 – 6.

13. Николайчук Г. А., Яковлев С. В., Луцев Л. В., Петров В. В. Цветкова Е. А., Мороз О. Ю., Наквасина Е. Ю., Трифонов С. А. Широкополосные многослойные поглощающие покрытия на основе напыленных структур гидрогенизированного углерода с магнитными наночистицами 3d-металлов // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. Том 2. Севастополь, Украина. – 2008. – С. 147 – 150.

14. Басков К.М. Метаматериал с повышенной механической прочностью и диэлектрической проницаемостью близкой к единице // Журнал радиоэлектроники. – 2013. № 9. – С. 30 – 37.

15.Meng Y., Zhang Z., Wang X., Hou X., Wang T., Guo X., Liu X., Tian M., Qu L., Wang L., Zhang X. «Flexible, superhydrophobic, and self-cleaning rGO/LDH/PPy-modified fabric for full X-band electromagnetic wave absorption». Composites Part B: Engineering. – Vol. 282.1 . – 2024. – P 111572.

16. Петров В. В, Николайчук Г. А., Яковлев С. В., Луцев Л. В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение // Компоненты и технологии. – 2008. – № 10. – С. 147 – 150.

17. Латыпова А. Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. № 6. – С. 70–76.

18. Моргунов Р.Б., Дмитриев А.И., Джардималиева Г.И., Помогайло А.Д., Розенберг А.С. и др. «Ферромагнитный резонанс кобальтовых наночастиц в полимерной оболочке». ФТТ. – 2007. – Т.49, вып. 8. – С. 1436 – 1441.

© Н. В. Прохоренкова, А. М. Жилкашинова, А. В. Троеглазова, 2025

УДК 677.021.122.223
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-272-278

А. А. Имашева[1]✉, К. Акатан[1], А. В. Троеглазова[2], С. К. Кабдрахманова[3]

Качественная характеристика подсолнечной лузги – потенциального сырья для получения целлюлозы

[1]Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
[2]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан
e-mail: Aidanaimash16@mail.ru

Аннотация. Среди отходов сельского хозяйства лузга семян подсолнечника является доступным, экономически выгодным сырьем для производства целлюлозы, требующим целевого использования. Однако установлено, что наличие в ее составе дополнительных углеводов, таких как фитомеланин, лигнин и гемицеллюлоза, напрямую влияет на выход и физико-химические свойства получаемых целлюлозных волокон. Поэтому важным условием при получении более качественной целлюлозы из лузги семян подсолнечника является применение эффектиной предварительной химической обработки. В статье рассматриваются сравнительные исследования физико-химических свойств исходной, обработанной водой, обработанной 5%-ным раствором гидроксида натрия лузги семян подсолнечника. Выявлено, что исходная лузга семян подсолнечника имеет более высокую зольность (2,2%), чем образцы лузги с предварительной водной (1,7%) и щелочной (1,2%) обработкой. Данные ИК-спектроскопии и XRD-дифрактометрии показывают, что с помощью предварительной водной и щелочной обработки можно снизить количество аморфных веществ в исходной лузге семян подсолнечника. В результате, предварительная химическая обработка может способствовать получению более качественной целлюлозы из лузги семян подсолнечника и облегчить процесс гидролиза целлюлозы.

Ключевые слова: лузга семян подсолнечника, целлюлоза, химическая предварительная обработка, лигнин, аморфные вещества

A. A. Imasheva[1]✉, K. Akatan [1], A. V. Troeglazova[2], S. K. Kabdrakhmanova[3]

Qualitative characteristics of sunflower husks – potential raw material for obtaining cellulose

[1]S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
[2]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[3]Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
e-mail: Aidanaimash16@mail.ru

Abstract. Among agricultural waste, sunflower seed husk is an accessible, cost-effective raw material for the production of cellulose, requiring targeted use. However, it has been established that the presence of additional carbohydrates in its composition, such as phytomelanin, lignin and hemicellulose, directly affects the yield and physicochemical properties of the resulting cellulose fibers. Therefore, an important condition for obtaining higher quality cellulose from sunflower seed husk is the use of effective preliminary chemical treatment. The article considers comparative studies of the

physicochemical properties of the original, water-treated, and 5% sodium hydroxide solution of sunflower seed husk. It was revealed that the original sunflower seed husk has a higher ash content (2,2%) than husk samples with preliminary water (1,7%) and alkaline (1,2%) treatment. IR spectroscopy and XRD diffractometry data show that the amount of amorphous substances in the original sunflower seed husk can be reduced by pre-treatment with water and alkali. As a result, pre-treatment with chemicals can help to obtain higher-quality cellulose from sunflower seed husk and facilitate the process of cellulose hydrolysis.

Keywords: sunflower seed husk, cellulose, chemical pretreatment, lignin, amorphous substances

Введение

Мировое загрязнение нашей планеты привело к необходимости достижения Целей в области устойчивого развития [1], что подразумевает эффективную утилизацию отходов, уменьшение вредного воздействия на окружающую среду. Из ряда сельскохозяйственных отходов [2], лузга семян подсолнечника является отходами, основная часть которых не используется и скапливается в большом объеме на территории маслоэкстракционных цехов [3]. В Казахстане, в частности, восточный регион является лидером по возделыванию подсолнечника в стране [4]. Тем не менее, эффективное использование отходов маслоэкстракционной промышленности все еще не предусмотрено [5]. Так как основным источником сырья для получения бумажных материалов все еще является древесина [6], использование быстровозобновляемых источников целлюлозы, таких как отходы растительного происхождения, могут значительно уменьшить вырубку деревьев. На фоне древесины, сельскохозяйственные отходы не уступают по содержанию целлюлозной массы и требуют менее щадящих методов обработки [7], так как содержат меньшее количество аморфных веществ. Например, по данным авторов [7-8], содержание целлюлозы в лузге семян подсолнечника может достигать 50%, тогда как древесина также содержит 50% целлюлозы [6]. Экономическая доступность, быстрая возобновляемость, достаточное содержание целлюлозы делают лузгу подсолнечника потенциальным источником для получения целлюлозы. Однако, получение целлюлозы из отходов растительного происхождения предусматривает поиск эффективных методов предварительной обработки сырья, гидролиза целлюлозы, использование других органических растворителей. Основным препятствием при получении целлюлозы из лузги подсолнечника являются содержание в ней лигнина, диоксида серы [9], фитомеланина [10]. Последние два из указанных веществ плохо растворяются в органических растворителях. Поэтому, при получении целлюлозы из лузги семян подсолнечника требуется эффективная предварительная обработка для удаления аморфных веществ [7]. Авторами [10] получен фитомеланин, и определена оптимальная концентрация гидроксида натрия (4%). При варке большая часть фитомеланина переходит в варочный раствор, и использованная шелуха остается. В связи с целью ресурсосбережения, в работе сравнительно изучены эффективность предварительной водной и щелочной обработки (гидроксид натрия 5%) лузги семян подсолнечника для использования при дальнейшем гидролизе целлюлозы.

Материалы

Объектами исследования являются следующие образцы: исходная необработанная шелуха семян подсолнечника (указана как SFH), обработанная дистиллированной водой шелуха семян подсолнечника (SFH_{H2O}), шелуха семян подсолнечника, обработанная дистиллированной водой с дальнейшей обработкой гидроксидом натрия (SFH_{NaOH}). В ходе работы использованы следующие реагенты и оборудование: дистиллированная вода (ASTM, NCCLS, ISO 3696, CAP), гидроксид натрия (NaOH, ≥98% pellets), сушильный шкаф (ШС-80-01-СПУ), муфельная печь (SNOL 8,2/1100 LSM). Все реагенты использовались без дополнительной очистки.

Методы исследования

Определение физико-химических характеристик – влажности и зольности лузги семян подсолнечника производилось по ГОСТ 13586.5-2015 и 10847-74.

ИК-Фурье-анализ

ИК-Фурье-анализ химических структур образцов SFH, SFH_{H2O} и SFH_{NaOH} проводился на ИК-спектрометре FT-801 (Simex, Russian), при разрешении 1 $см^{-1}$ и длине волны 450–4700 $см^{-1}$ по стандартной методике с использованием универсальной приставки однократного нарушенного полного внутреннего отражения и зеркально-диффузного отражения с верхним расположением образца, при температуре 25,2°C и количество сканов 100.

Были сравнительно исследованы ИК-спектры: 1) лузги семян подсолнечника без обработки (исходное сырье); 2) обработанной водой лузги семян подсолнечника; 3) обработанной водой с дальнейшей обработкой щелочью лузги семян подсолнечника.

XRD анализ

Кристаллическую структуру SFH, SFH_{H2O} и SFH_{NaOH} изучали методом рентгеновской дифракции на спектрометре X´PertPRO (PANanalitical, Нидерланды) с использованием монохроматизированного медного излучения с шагом сканирования 0,02º. Угол измерения составлял 10-40º, напряжение рентгеновской трубки 40 кВ, ток 45 мА, время измерения в одной точке 0,5 с.

Результаты и обсуждение

В результате исследований влажность исходной шелухи SFH составила 2,6%. Было определено, что содержание золы в SFH, SFH_{H2O} и SFH_{NaOH} равно, соответственно, 2,2%, 1,7% и 1,2%. По литературным данным, зольность лузги семян подсолнечника равна 2,4% [11]. Относительно высокая зольность указывает на большее содержание диоксида серы, лигнина в SFH и меньшее на 0,5 и 1% в SFH_{H2O} и SFH_{NaOH} соответственно, так как обработка дистилированной водой приводит к растворению низкомолекулярных соединений, водорастворимых лигнинов [12-13] и полисахаридов [9]. При щелочной обработке растворяются щелочнорастворимые

лигнины [12-13] и диоксид серы [9], которые являются аморфными веществами в составе целлюлозного сырья.

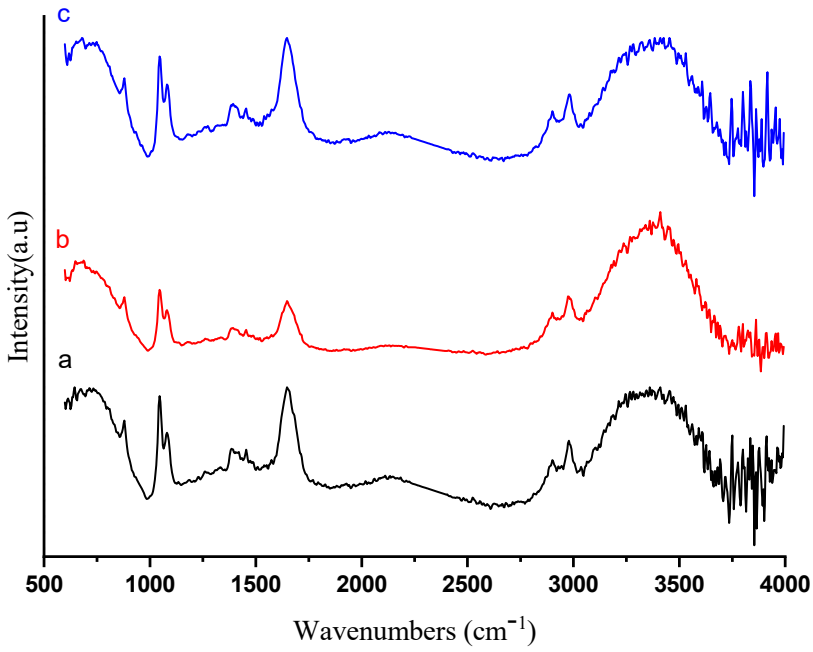


Рис. 1. ИК-спектры: a) лузга семян подсолнечника без обработки (исходное сырье); b)лузга семян подсолнечника, предварительно обработанная дистилированной водой; c) лузга семян подсолнечника, предварительно обработанная водой и щелочью

Из рис. 1, видно, что в ИК-спектрах всех образцов присутствуют плоскостные скелетные колебания фенольного ароматического кольца при длине волны 1505–1600 $см^{-1}$, что объясняется наличием лигнина [14]. Тем не менее, полосы при 1125 $см^{-1}$ и 1510, 1600, 1659, 1726 $см^{-1}$ имеют разную интенсивность, что может быть связано с типичными моделями лигнина, содержащегося в образце. Полоса кристалличности при 1430 $см^{-1}$ более интенсивна в SFH и SFH_{NaOH}, однако наличие усиленных пиков при длине волны 900 $см^{-1}$ показывает наличие аморфного лигнина. В связи с этим можно сказать, что SFH_{H2O} имеет менее выраженный пик лигнина и, соответственно, менее интенсивную полосу кристалличности. Это может быть связано с большим скоплением лигнина на поверхности целлюлозного сырья в результате водной обработки [15].

Между тем, сигнал валентных колебаний группы –OH и связи C–H наблюдается между интервалами поглощения 3337,8 $см^{-1}$ и 2848,5–2915,4 $см^{-1}$. Колебательный сигнал валентной двойной связи C=C углерода наблюдается на длине волны 1622,4 $см^{-1}$, а деформационное движение группы CH_2 можно увидеть в диапазоне 1434,3–1361,5 $см^{-1}$. Из данных ИК-спектров, видно, что все образцы

имеют полукристаллическую структуру и полосы поглощения, интенсивности функциональных групп молекулы соответствуют целлюлозному сырью [16].

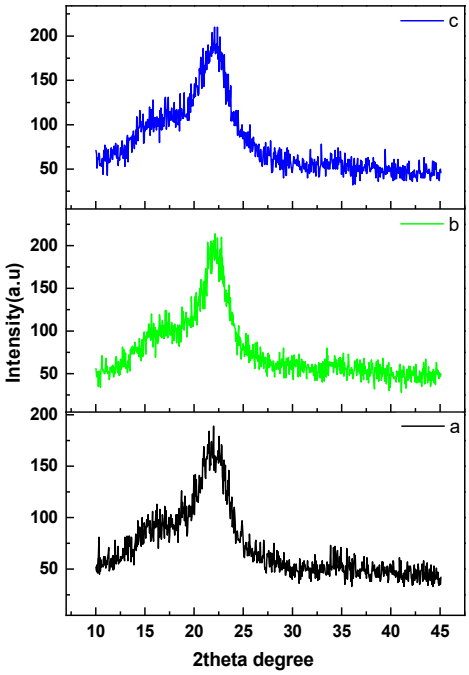


Рис. 2. XRD дифрактограммы: a) лузга семян подсолнечника без обработки (исходное сырье); b) лузга семян подсолнечника, предварительно обработанная дистилированной водой; c) лузга семян подсолнечника, предварительно обработанная водой и щелочью

На рис. 2 видны интенсивные дифракционные пики $16{,}81^0$, $22{,}25^0$ и $35{,}78^0$ при значениях 2θ на рентгенограмме. Они свидетельствуют о том, что образцы SFH, SFH_{H2O} и SFH_{NaOH} имеют кристаллическую структуру [17,18]. Однако, пики дифракторгамм образцов SFH_{H2O} и SFH_{NaOH} намного выше относительно спектра SFH, что свидетельствует о частичном удалении аморфных веществ из сырья при химической предварительной обработке.

По литературным данным, щелочная обработка является более эффективной для удаления аморфного лигнина, фитомеланина, диоксида кремния. Относительно невысокий дифракционный пик образца SFH_{NaOH} может быть связан с набуханием [19] целлюлозного сырья при щелочной обработке. Менее интенсивный пик после щелочной обработки, авторы [20] связывают с растворением некоторых полисахаридов, которые могут участвовать в гидролизе целлюлозы.

Результаты данных ИК- и XRD- анализов показывают, что образцы лузги семян подсолнечника, обработанные водой и щелочью, содержат больше кристаллических областей, чем исходная лузга семян подсолнечника.

Заключение

В результате сравнительного исследования установлено, что водная и щелочная обработка способствуют уменьшению зольности лузги семян подсолнечника на 22,7% и 54,5% относительно исходного сырья.

По данным ИК- и XRD анализов, выявлено, что водная и щелочная химическая обработка не разрушают химическую структуру целлюлозы, но удаляют часть аморфных веществ. Все три образца лузги семян подсолнечника имеют кристаллическу структуру.

Водная обработка является преимущественно «зеленым» методом, но удаляет относительно меньшую часть аморфных веществ. Щелочная обработка сырья удаляет больше аморфных веществ, в том числе диоксида серы, фитомеланина. Выбор вида предварительной обработки зависит от целей применения получаемых целлюлозных материалов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19175733).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цели в области устойчивого развития [Электронный ресурс]. – URL: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/.

2. Подсолнечник превзошел пшеницу по рентабельности в Казахстане [Электронный ресурс]. – URL: https://eldala.kz/specproekty/17608-podsolnechnik-prevzoshel-pshenicu-po-rentabelnosti-v-kazahstane.

3. KazOil 2018: тренд позитивный (АПК-Информ: ИТОГИ №1 (55)) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.apk-inform.com/ru/events/1105655.

4. Общая посевная площадь в 2023 году составит более 23 млн га – МСХ РК [Электронный ресурс]. – URL: https://primeminister.kz/ru/news/obshchaya-posevnaya-ploshchad-v-2023-godu-sostavit-bolee-23-mln-ga-mskh-rk-23132.

5. Сей-Нар. Производство [Электронный ресурс]. – URL: https://seynar.kz/activities/production/#sunflower-cake.

6. Waliszewska. B., Mleczek. M., Zborowska. M. et al. Changes in the chemical composition and the structure of cellulose and lignin in elm wood exposed to various forms of arsenic// Cellulose 26, 6303–6315 (2019). https://doi.org/10.1007/s10570-019-02511-z.

7. Akatan K., Kabdrakhmanova S., Kuanyshbekov T., Ibraeva Z., Battalova A., Joshy KS., Thomas Sabu. Highly-efficient isolation of microcrystalline cellulose and nanocellulose from sunflower seed waste via environmentally benign method // Cellulose 29(7), May 2022. DOI:10.1007/s10570-022-04527-4.

8. Chen Shanshan, Tao Hongjiang, Wang Yajing, Ma Zhongsu, Zhang Liping. Process optimization of nanocrystalline cellulose from sunflower seed hull and its characterization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 302-308. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.041.

9. Romruen O., Karbowiak T., Tongdeesoontorn W., Shiekh K.A., Rawdkuen S. Extraction and Characterization of Cellulose from Agricultural By-Products of Chiang Rai Province, Thailand. Polymers 2022, 14, 1830. https://doi.org/ 10.3390/polym14091830.

10. Иванова Л.А., Фоменко И.А., Сергеева А., Чурмасова Л.А., & Кабаржан Ж.К. Разработка технологий получения фитомеланинов на отходах масличного производства// Health, Food & Biotechnology. –2019. –Т.1. –№2. –С. 245, https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s245.

11. Филипенко Н.А., Броднева А.В., Тунцев Д.В. Исследование физико-химических свойств лузги подсолнечника // Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. –Курск, 2022. –Т.5. С.291–293.

12. Guan W., Xu G., Duan J., & Shi S. (2018). Acetone–Butanol–Ethanol Production from Fermentation of Hot-Water-Extracted Hemicellulose Hydrolysate of Pulping Woods. Industrial & Engineering Chemistry Research. —V. 57. —№2.—Pp.775–783.

13. Коринова В.Ю., Базарнова Н.Г., Ольхов Ю.А. Влияние щелочной обработки на изменение структуры древесины // Химия растительного сырья, №4(2003). – С. 17–24.

14. Имашева А.А., Кабдрахманова С.К., Ибраева Ж.Е., Кудайбергенов С.Е., Акатан К., Абилев М.Б. Изучение возможности извлечения целлюлозы из остатков масличных культур органосольвентным методом // Вестник НЯЦ РК, выпуск 1, март 2020, с. 35–39.

15. Zhang L., Yan L., Wang Z. et al. Characterization of lignin derived from water-only and dilute acid flowthrough pretreatment of poplar wood at elevated temperatures// Biotechnol Biofuels 8, 203 (2015). https://doi.org/10.1186/s13068-015-0377-x].

16. Battalova A.K., Kabdrakhmanova S.K., Akatan K., Beisebekov M.M., Kantay N., Ibraeva Zh.E., Mausumbayeva A.M., Merck L.B. Features of microcrystalline cellulose produced from sunflower seeds of different oil content // International Journal of Biology and Chemistry 16, № 1 (2023), https://doi.org/10.26577/ijbch.2023.v16.i1.08.

17. Ye D., Rongpipi S., Kiemle S.N. et al. Preferred crystallographic orientation of cellulose in plant primary cell walls. Nat Commun 11, 4720 (2020). https://doi.org/10.1155/2023/5037027.

18. Шипина О.Т., Валишина З.Т., Косточко А.В., Рентгенодифракционный анализ различных видов целлюлозы // Вестник технологического университета. —2015. –Т.18. – №7.

19. Straw Heru Suryanto, Eko Marsyahyo, Yudy Surya Irawan, and Rudy Soenoko. Effect of Alkali Treatment on Crystalline Structure of Cellulose Fiber From Mendong (Fimbristylis globulosa) Key Engineering Materials Vols. 594-595 (2014), pp 720–724.

20. Raspolli Galletti, Anna Maria and Antonetti, Claudia. "5 Biomass pretreatment: separation of cellulose, hemicellulose, and lignin – existing technologies and perspectives". Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels: From Biomass to Chemicals and Fuels, edited by Michele Aresta, Angela Dibenedetto and Franck Dumeignil, Berlin, Boston: De Gruyter, 2012, pp. 101–122. https://doi.org/10.1515/9783110260281.101.

© А. А. Имашева, К. Акатан, А. В. Троеглазова, С. К. Кабдрахманова, 2025

УДК 535.3
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-279-282

Н. С. Никитенко[1]✉, А. В. Бритвин[1], Б. В. Поллер[1,2]

Методы оптимизации люминесцентных антенн для атмосферных ультрафиолетовых телекоммуникаций

[1]Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: nikitenkons@mail.ru

Аннотация. Полимерные люминесцентные антенны представляют интерес благодаря разнообразию форм, малому весу, широким углам поля зрения и устойчивости к электромагнитному воздействию. Доступность оптических полимеров и ультрафиолетовых (УФ) люминофоров, а также шаг вперед в производстве УФ полупроводниковых излучателей стимулировали разработку ультрафиолетовых атмосферных телекоммуникаций. Приведены методы, позволяющие повысить эффективность применения планарно-волоконных люминесцентных антенн в системах связи.

Ключевые слова: атмосферная ультрафиолетовая линия связи, полимерные планарно-волоконные структуры, люминесцентная антенна

N. S. Nikitenko[1]✉, A. V. Britvin[1], B. V. Poller[1,2]

Methods of optimization of luminescent antennas for use in atmospheric ultraviolet telecommunications

[1] Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: nikitenkons@mail.ru

Abstract. Polymer luminescent antennas are of interest due to their variability in shape, low weight, wide field of view and resistance to electromagnetic interference. The availability of optical polymers and UV luminophores, as well as advances in the production of UV semiconductor emitters, have stimulated the development of UV communication systems. Methods are presented that allow increasing the efficiency of using planar-fiber luminescent antennas in communication systems.

Keywords: atmospheric ultraviolet communication line, polymer planar-fiber structures, luminescent antenna

Введение

Увеличение объемов передаваемой информации вне помещений и рост потребностей в передачи данных между мобильными объектами без использования радиодиапазона создают потребность в разработке атмосферных оптических линий связи с новыми диапазонами и антенными преобразователями [1-5].

Люминесцентные антенны (ЛА) представляют собой планарные и волоконные преобразователи с гомогенно распределенными люминофорами в матрице из оптических полимеров. Преобразователи способны поглощать излучение и переизлучать его на другой длине волны. За счет волноводного эффекта излучение люминесценции распространяется по волноводу и поступает к выходным торцам ан-

тенны. ЛА обладают углом поля зрения до 120 градусов, небольшим весом (несколько десятков грамм, в зависимости от размеров) и гибкостью конфигурации при изготовлении, пригодны для работы в условиях сильных электромагнитных помех и во взрывоопасных зонах.

Использование люминофоров со спектром поглощения в УФ области позволяет исключить влияние прямой солнечной засветки (солнечно-слепой диапазон). Для использования в ЛА перспективны оптические полимеры (полиметилметакрилат (ПММА), акриловые смолы) и люминофоры группы кумаринов.

Для получения энергоэффективных, быстрых преобразователей необходимы методы оптимизации для определения материала полимерной матрицы, для выбора люминофора с высокой квантовой эффективностью. Необходимы методы оптимизации спектральных характеристик матрицы, люминофора, фильтров, источников информации и детектора для достижения необходимой пропускной способности, помехозащищенности и энергоэффективности.

Метод с применением фотоустойчивых люминофоров с высоким квантовым выходом

Энергоэффективность системы является важной эксплуатационной характеристикой. Во время эксплуатации под воздействием внешних факторов квантовый выход люминесценции постепенно снижается. Метод определения фотоустойчивых люминофоров позволяет увеличить срок службы уличной ЛА.

В проведенных нами ранее исследованиях [6] установлено, что люминесцентные антенны с люминофорами кумарин 47, 120 более устойчивы к солнечному облучению, чем люминесцентные антенны с люминофорами POPOP, NOL8.

В работе [7] докладывается о синтезе и испытаниях фотостойкости новых люминофоров – аналогов кумаринов 47, 120, которые на 20-28% более устойчивы к действию мощного светового излучения.

Метод оптимизации ЛА с применением защитных фильтров

Применение защитных оптических фильтров позволяет увеличить пропускную способность УФ-линий связи, сократив воздействие излучения вне диапазона длин волн передатчика, снизить уровень помех и защитить полимерные структуры от пыли и загрязнений.

При проведении экспериментов с люминесцентными антеннами со спектром поглощения в УФ области использовали защитный фильтр УФС–5 для выделения областей спектра 250-400 нм и УФС–8 для выделения областей спектра 320-390 нм [3,8].

Спектральный диапазон солнечной радиации от 280 нм и меньше блокируется озоновым слоем планеты и атмосферой. Отсутствие естественных помех, обусловленных солнечным излучением, в УФ-С диапазоне делает солнечно-слепой диапазон перспективным для люминесцентных антенн атмосферных ультрафиолетовых телекоммуникаций.

Применение передатчиков с длиной волны излучения менее 280 нм и УФ-люминофоров позволяет снизить уровень оптических помех для УФ-линий связи.

Оптимизация квантовых параметров ЛА за счет применения поверхностно-активных веществ (ПАВ)

На квантовый выход люминесцентной антенны влияет не только выбор начальных компонентов – полимера матрицы и люминофора, но и способ распределения люминофора в матрице.

Растворение с ПАВ люминофора перед вводом в раствор полимера позволяет увеличить растворимость люминофоров, сдвигать спектры флуоресценции, увеличить квантовый выход и фотостабильность.

В статье [9] приводится сравнение квантового выхода кумаринов 334, 343 в полимерных матрицах в зависимости от применяемых ПАВ. Данные о спектрально-люминесцентных свойствах кумаринов в ПММА и поликарбонате (ПК) в присутствии ПАВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Спектрально-люминесцентные свойства кумаринов в полимерных матрицах

Люминофор	Полимер	ПАВ	Квантовый выход
Кумарин 334	ПММА	Brij 35	0,89
		Triton X-100	0,75
		Tween 40	0,83
	ПК	Brij 35	0,78
		Triton X-100	0,70
		Tween 40	0,74
Кумарин 343	ПММА	Brij 35	0,80
		Triton X-100	0,73
		Tween 40	0,68
	ПК	Brij 35	0,77
		Triton X-100	0,69
		Tween 40	0,66

Подбор и использование ПАВ при разработке технологии производства люминесцентных антенн, в соответствии с материалом матрицы и применяемых люминофоров, позволяет оптимизировать энергоэффективность ЛА.

Оптимизация быстродействия ЛА

Быстродействие полимерных преобразователей определяется кинетикой люминофора. Высокие значения скоростей испускания для переходов флуоресценции приводят к временам затухания флуоресценции порядка 1-10 нс.

Исследование кинетики люминофоров кумарин 47, 120, NOL8 в акриловой пленке показало, что количество фотонов снижается в 100 раз за 14-19 нс [6].

Время затухания флуоресценции люминофора, равное 10 нс, ограничит максимальную скорость передачи информации значением 100 Мбит/с. Реабсорбция приведет к ограничению максимальной скорости передачи информации до 50 Мбит/с или к увеличению количества битовых ошибок. Время затухания, равное 1 нс, позволит достигнуть скорости передачи информации 1000 Мбит/с.

Заключение

Изготовленные люминесцентные антенны из оптических полимеров с добавками фотоустойчивых УФ-люминофоров продемонстрировали возможность передачи через атмосферу цветного видеосигнала высокого качества [9]. Применение приведенных методов оптимизации также позволяет повысить время эксплуатации люминесцентных антенн [10]. Потенциальная пропускная способность люминесцентных антенн может достигать 1000 Мбит/с на одной длине волны.

Люминофоры группы кумаринов перспективны для применения в планарно-волоконных приемных антеннах атмосферных ультрафиолетовых систем.

При использовании солнечно-слепого диапазона в УФ-линии связи значительно увеличивается устойчивость к солнечным помехам.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и образования РФ (НИОКТР Рег. № 121033100068-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багаев С. Н., Бритвин А. В., Поллер Б. В. и др. Развитие лазерных информационно-сенсорных систем с планарными волноводами и элементами микрооптики для наземно-космических телекоммуникаций и локальных сетей связи и контроля // Проблемы функционирования информационных сетей: Материалы IX международной конференции. – Прайс Курьер. – 2006. – С. 22–25.

2. Поллер Б. В., Бритвин А.В., Щетинин Ю. И. О построении систем ориентации беспилотных летательных аппаратов с использованием ультрафиолетовых лазеров и полимерных волноводных антенн // 11 межд. научно-техн. конференция «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: ВГУ. – 2008. – С. 8–10.

3. Бритвин А. В., Коняев С. И., Никитенко Н. С., Поважаев А. В., Поллер Б. В., Щетинин Ю. И. Методы построения и экспериментальные характеристики ультрафиолетовых атмосферных линий связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 1. – С. 21–25.

4. Peyronel T., Quirk K. J., Wang S. C., Tiecke T. G. Luminescent detector for free-space optical communication // Optica. – 2016. – Vol. 3, No. 7.– P. 787–792.

5. Manousiadis P. P., Rajbhandari S., Mulyawan R., Vithanage D. A., Chun H., Faulkner G., O'Brien D. C., Turnbull G. A., Collins S., Samuel I. D. W.. Wide field-of-view fluorescent antenna for visible light communications beyond the étendue limit // Optica, 2016. – Vol. 3. No. 7.– P. 702–706.

6. Бритвин А. В., Никитенко Н. С., Плюснин В.Ф., Поллер Б. В., Поллер А. Б., Шахов Н. В. О фотостабильности акрилатных и полиметилметакрилатных планарно-волоконных структур с люминофорами Coumarin 7, 47, 120; POPOP; NOL8 для ультрафиолетовых информационных систем // Оптика и спектроскопия.– Т. 130, выпуск 2. – 2022. – С. 311–316.

7. Комлев И.В. Синтез и исследование органических люминофоров и других функциональных соединений для современных световых технологий // Диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук: 02.00.03. – Москва . – 2016. – 426 с.

8. Бритвин А. В., Плюснин В. Ф., Поллер Б. В., Никитенко Н. С. Энерго-временные преобразования лазерных импульсов в полимерных структурах с люминофорами для систем телекоммуникаций с беспилотными летательными аппаратами // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 2. № 5. – С. 211–221.

9. Цаплев Ю. Б. Настройка люминесцентных преобразователей на основе кумаринов и их фотостабильность // Прикладная спектроскопия. Том 84. № 5. – 2017. – С. 803–809.

10. Бритвин А. В., Никитенко Н. С., Поллер А. Б., Поллер Б. В., Шахов Н. В. Характеристики трендов в динамике излучения полимерных планарно-волноводных структур с люминофорами для ультрафиолетовых информационных систем при длительных натурных испытаниях // Проблемы информатики. – 2022. № 3. – С. 5–13.

© Н. С. Никитенко, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер, 2025

УДК 535.3
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-283-287

Л. В. Шастин [1,3]✉, А. В. Бритвин[1], Б. В. Поллер[1,2]

О характеристиках атмосферных лазерных линий для систем мониторинга природных и антропогенных объектов

[1]Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Министерство науки и инновационной политики Новосибирской области
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: leonid_shastin@mail.ru

Аннотация. Проблема мониторинга природных и антропогенных объектов в настоящее время вызывает огромный интерес по всему миру. Использование для передачи информации лазерного излучения может помочь значительно увеличить эффективность такого мониторинга. Однако, приемники и передатчики лазерного излучения имеют ряд особенностей и ограничений, особенно с учетом размещения приемо-передающих систем на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Свои требования накладывает и необходимость качественной передачи информации. Таким образом, встает вопрос, какие конфигурации и методы построения передающей лазерной системы использовать, чтобы обеспечить максимальную эффективность передачи информации, а, следовательно, и мониторинга природных и антропогенных объектов. В данной статье мы определили два наиболее эффективных метода построения передающей лазерной системы, а также провели их экспериментальную оценку.

Ключевые слова: ультрафиолетовая (УФ) лазерная передающая система**,** атмосферная оптическая лазерная связь, системы мониторинга, управление БПЛА

L. V. Shastin [1,3]✉, A. V. Britvin [1], B. V. Poller [1,2]

Characteristics of atmospheric laser lines for monitoring systems of natural and anthropogenic objects

[1] Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
[3] Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region, Russian Federation
e-mail: leonid_shastin@mail.ru

Abstract. The problem of monitoring natural and anthropogenic objects is currently of great interest around the world. The use of laser radiation to transmit information can help significantly increase the effectiveness of such monitoring. However, laser radiation receivers and transmitters have a number of features and limitations, especially considering the placement of receiving and transmitting systems on unmanned aviation systems (UAVs). The need for high-quality information transmission also imposes its own requirements. Thus, the question arises, which configurations and methods of building a transmitting laser system should be used to ensure maximum efficiency of information transmission, and, consequently, monitoring of natural and anthropogenic objects. In this article, we have identified two of the most effective methods for constructing a transmitting laser system, and also conducted their experimental evaluation.

Keywords: UV laser transmission system, atmospheric optical laser communication, monitoring systems, UAV control

Введение

На переднем крае науки сейчас находится множество областей, и лазерное излучение и его применения – одна из них. Взять, например, нишу передачи информации. Беспроводная оптическая лазерная наземно-космическая связь позволяет передавать информацию на значительно большее расстояние, чем при использовании оптического волокна. Атмосферная оптическая лазерная связь (АОЛС) позволяет передавать большие объемы информации в условиях интенсивных станционных и индустриальных радиопомех, производится лазерная аппаратура связи с пропускной способностью до десятков гигабит в секунду [1-5].

Атмосферный оптический канал также может позволить передать сигнал частоты от стандарта с достаточно высокой стабильностью, что продемонстрировано в работе [3]. В работах [4,5] рассматривается вопрос передачи сигнала от стандарта частоты на 100 км через оптоволокно и на 113 км через атмосферный канал.

Для увеличения эффективности лазерной связи с подвижными объектами в ИЛФ СО РАН в начале века были инициированы исследования и разработки люминесцентных преобразователей лазерных импульсов для создания люминесцентных планарно-волоконных антенн. С тех пор такие люминесцентные антенны активно исследуются и совершенствуются [1].

С помощью лазерного оптического канала в 2024 году были проведены измерения гравитационного смещения частоты в водородных часах [6].

Лазерные атмосферные линии со стандартом частоты используются для развития новых методов мониторинга акустических полей в атмосфере [7,8].

С помощью лазерной связи можно осуществлять управление беспилотным летательным аппаратом для лазерного мониторинга природных и антропогенных объектов, в связи с чем развиваются методы построения лазерных информационных и сенсорных систем в ультрафиолетовом диапазоне [9-11].

Методы построения излучающих УФ систем

Можно выделить несколько основных методов построения излучающих УФ систем для атмосферных лазерных линий в рамках систем мониторинга природных и антропогенных объектов. Рассмотрим характеристики методов, связанных с суммированием излучения нескольких источников с целью увеличения выходной мощности.

1. Суммирование матрицы УФ лазерных диодов (ЛД). Вполне подходит как для наземного пункта, так и для подвижного объекта, так как позволяет сделать сравнительно небольшую и легкую излучающую систему.

2. Суммирование излучения разнесенных источников. Малоприменимо для подвижных объектов, но, с другой стороны, отсутствуют массогабаритные ограничения. В связи с этим открывается возможность использовать более мощные источники излучения.

3. Суммирование за счет кольцевой линии задержки. Использование такого сумматора при создании излучающей системы позволит значительно увеличить ее выходную мощность. Является значительно более эффективным, по сравнению с использованием простого волоконного сумматора, однако, сильно проигрывает ему в простоте реализации.

4. Дополнительные методы. Эти методы, такие как, например, использование линзы с сумматором, перетяжка оптоволокна и расширяющиеся световоды или линза на торце волокна предлагают лишь модификации отдельных элементов и являются, скорее, дополнением к рассмотренным ранее методам.

Экспериментальная оценка излучающих систем

Для обеспечения эффективного управления БПЛА излучающая система должна быть многоволновой и имеющей перестраиваемый по расстоянию угол расходимости.

Для оценки такой системы был проведен следующий эксперимент. В цилиндрический защитный корпус размещались на определенном расстоянии друг от друга линза и УФ излучатель. Для имитации передачи сигнала на БПЛА излучатель через балластное сопротивление был подключен к источнику импульсных сигналов Rigol, с которого на излучатель подавались прямоугольные импульсы.

Чтобы измерить диаметр пучка, а также его угол расходимости, на расстоянии 470 см от линзы был установлен экран. Измерения проводились для трех случаев: когда излучатель находился в фокальной плоскости линзы (то есть расстояние от излучателя до линзы $L_{ИЛ} = 5$ см), когда излучатель отстоял от фокальной плоскости линзы на 1 см ($L_{ИЛ} = 6$ см) и, наконец, когда излучатель отстоял от фокальной плоскости линзы на 2 см ($L_{ИЛ} = 7$ см).

В каждом из трех случаев измерялись значения облученности в трех точках: в центре яркого пятна $I_{яр}$, посередине рассеянного пятна $I_{сер}$ и на краю рассеянного пятна $I_{кр}$. Результаты всех этих измерений представлены ниже (Табл. 1).

Проведенный эксперимент показал, что метод построения передающих систем управления БПЛА с перестраиваемым по расстоянию углом расходимости излучения, например, с использованием волоконных световодов разной длины, является перспективным для дальнейших исследований.

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки передающей системы с перестраиваемым по расстоянию углом расходимости

Расстояние от излучателя до линзы $L_{ИЛ}$, см	5	6	7
Диаметр яркого пятна $d_{яр}$, см	5,5	11	20
Диаметр рассеянного пятна (по краю) $d_{кр}$, см	28	50	70
Облученность (яркое пятно) $I_{яр}$, у. е.	1500	330	90
Облученность (по середине рассеянного пятна) $I_{сер}$, у. е.	500	130	50
Облученность (по краю) $I_{кр}$, у. е.	200	80	10
Угол расходимости яркого пятна $\theta_{яр}$, °	0,33	0,67	1,21
Угол расходимости рассеянного пятна $\theta_{рас}$, °	1,7	3	4,25

Также была проведена экспериментальна оценка дальности передающей системы управления БПЛА без использования сумматора. Излучающая система помещалась на штатив и подключалась к источнику импульсных сигналов Rigol, с которого на излучатель подавались прямоугольные импульсы. На другой стороне оптической трассы размещался широкополосный фотоприемный блок, перед которым поочередно размещались два типа антенн: линзовая и дифракционная. В ходе эксперимента также варьировались: частота от f = 10 кГц до f = 30 кГц и длина трассы от L = 17 м до L = 75 м. После каждого изменения измерялась облученность на фотоприемном блоке, а также с помощью цифрового осциллографа АКИП измерялась амплитуда принятого фотоприемником сигнала. При увеличении расстояния в 4,4 раза выходной сигнал на трассе уменьшался примерно в 30-35 раз, в зависимости от юстировки излучателя и фотоприемника на трассе.

При измерениях видно, что даже на сравнительно больших расстояниях сигнал успешно регистрируется и без помощи антенн. С помощью же антенн, ожидаемо, удается добиться уровня сигнала, достаточного для корректной работы системы управления БПЛА даже на расстоянии 75м.

Подводя итог проведенному эксперименту, можно сделать вывод, что исследуемая система и без сумматора отлично показала себя в рамках канала передачи информации, а, следовательно, использование в такой системе сумматора может существенно увеличить дистанцию и, само собой, эффективность передачи информации на БПЛА.

Заключение

По итогам проделанной работы была проведена экспериментальная оценка возможности и перспективности реализации систем передачи информации на БПЛА. Для этого осуществлялась серия экспериментов, направленных на измерение определенных параметров излучающей системы. По результатам этих экспериментов удалось подтвердить перспективность использования волоконного сумматора, а также использования перестройки угла расходимости излучающей системы по изменению расстояния связи.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и образования РФ (НИОКТР Рег. № 121033100068-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бритвин А. В., Коняев С. И., Никитенко Н. С., Поважаев А. В., Поллер Б. В., Щетинин Ю. И. Методы построения и экспериментальные характеристики ультрафиолетовых атмосферных линий связи // Успехи современной радиоэлектроники – М. «РАДИОТЕХНИКА». – №1, 2019 г. – С. 25–28.

2. Younus, Othman & Riaz, Amna & Binns, Richard & Scullion, Eamon & Wicks, Robert & Vernon, Jethro & Graham, Christopher & Bramall, David & Schmoll, Jurgen & Bourgenot, Cyril. (2024). Overview of Space-Based Laser Communication Missions and Payloads: Insights from the Autonomous Laser Inter-Satellite Gigabit Network (ALIGN). Aerospace. 11. 907.

3. Кудеяров К.С. Передача ультрастабильных сигналов оптической частоты с активной компенсацией фазовых шумов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 2023.

4. Wang, Siwei & Sun, Dongning & Dong, Yi & Xie, Weilin & Shi, Hongxiao & Yi, Lilin & Hu, Weisheng. (2014). Distribution of high-stability 10 GHz local oscillator over 100 km optical fiber with accurate phase-correction system. Optics Letters. 39. 888-91.

5. Shen, Qi & Guan, Jian-Yu & Wang, Jianyu & Zeng, Ting & Hou, Lei & Li, Min & Cao, Yuan & Han, Jin-Jian & Lian, Meng-Zhe & Chen, Yan-Wei & Peng, Xin-Xin & Wang, Shao-Mao & Zhu, Dan-Yang & Shi, Xi-Ping & Wang, Zheng-Guo & Li, Ye & Liu, Wei-Yue & Pan, Ge-Sheng & Wang, Yong & Pan, Jian-Wei. (2022). 113 km Free-Space Time-Frequency Dissemination at the 19th Decimal Instability. 10.21203/rs.3.rs-1394733/v1.

6. Измерение гравитационного смещения частоты в водородных часах при передаче сигнала через оптический и радиочастотный каналы связи = Measuring the gravitational frequency shift in a hydrogen clock when transmitting a signal via optical and radio frequency communication channels / А. К. Дмитриев, А. С. Толстиков, Н. Н. Головин, К. Н. Савинов, В. С. Болдырев, С. А. Алексейцев [и др.]. – DOI 10.17212/2782-2001-2024-4-59-77. – Текст : непосредственный // Системы анализа и обработки данных = Analysis and data processing systems. – 2024. – № 4 (96). – С. 59–77.

7. Highly sensitive detection of infrasonic oscillations in the atmosphere using synchronous laser lines with a frequency standard / Britvin A.V., Borisov B.D., Poller B.V., Poller A.B., Khairetdinov M.S., Khohryakov A.S. // Modern problems of laser physics – MPLP-2021: The IX International Symposium, 22-28 August 2021, Novosibirsk: technical digest. – Novosibirsk: OOO Ofset-TM, 2021. – C.129-130.

8. Бритвин А.В., Коняев С.И., Поллер Б.В., Поллер А.Б., Хайретдинов М.С. Экспериментальные характеристики лазерной атмосферно-волоконной системы обнаружения акустических инфразвуковых колебаний в задачах геоэкологического мониторинга = Experimental characteristics of an atmospheric-fiber laser system for detecting acoustic infrasound vibrations in geoecological monitoring tasks. // Автометрия, 2023. – Т. 59, № 6. – С. 74–79.

9. Бритвин А. В., Никитенко Н. С., Плюснин В. Ф., Поважаев А. В., Поллер Б. В. Исследования по полимерной нанофотонике для синтеза сенсорных и телекоммуникационных устройств // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018.– С.– 88–94.

10. Бритвин А. В., Поважаев А. В., Никитенко Н. С., Поллер Б. В. Характеристики оптико-электронной системы для контроля подвижных объектов и сред в приземной зоне лазерного мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2018»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – С.– 151–157.

11. Шастин Л. В., Бритвин А. В., Поллер Б. В. О характеристиках источников оптических излучений для атмосферной связи с БПЛА с использованием волоконного и кольцевого сумматоров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Междунар. науч. конгр., 23–27 мая 2024 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2024»: сб. материалов в 8 т. Т. 8, №1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. – С.– 13–17.

© Л. В. Шастин, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер, 2025

УДК 535.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-288-296

А. П. Золоторенко[1,2]✉, В. П. Корольков[2], А. Р. Саметов[2], В. В. Черкашин[2]

Коррекция микроструктуры скрещенных дифракционных решёток при термохимической лазерной записи

[1]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Аннотация. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой двумерные искусственно созданные структуры, модифицирующие фазу и амплитуду электромагнитной волны в каждой точке поверхности, что позволяет формировать световые пучки с заданными пространственными характеристиками. При формировании ДОЭ методом термохимической лазерной записи возникают термохимические искажения, проявляющиеся в деформации границ экспонируемых областей из-за неоднородного теплового воздействия лазерным пучком. В рамках исследования установлены корреляционные зависимости между величиной сдвига границ и мощностью лазерного пучка. На основе полученных данных разработан и экспериментально апробирован метод коррекции искажений, сочетающий компенсацию сдвигов границ и введение «микровыступов». Экспериментально продемонстрировано повышение однородности дифракционных порядков даммановских решёток, достигаемое за счёт предложенной методики, что подтверждает её эффективность для создания высокоточных ДОЭ.

Ключевые слова: Дифракционно оптический элемент (ДОЭ), термохимическая лазерная запись, коррекция скрещенных дифракционных решёток

A. P. Zolotorenko[1,2]✉, V. P. Korolkov[2], A. R. Sametov[2], V. V. Cherkashin[2]

Correction of the microstructure of crossed diffraction gratings during thermochemical laser recording

[1]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Institute of Automation and Electrometry of SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.zolotorenko@g.nsu.ru

Abstract. Diffractive optical elements (DOEs) are artificially engineered two-dimensional structures designed to modulate the phase and amplitude of an electromagnetic wave at each point across their surface, enabling the generation of light beams with predefined spatial characteristics. During the fabrication of DOEs via thermochemical laser writing, thermochemical distortions emerge, manifesting as deformations at the boundaries of exposed regions due to non-uniform thermal effects induced by the laser beam. This study establishes correlational relationships between the magnitude of boundary shifts and the laser beam power. Based on these findings, a distortion correction method has been developed and experimentally validated, combining boundary shift compensation with the introduction of «microprotrusions». Experimental results demonstrate enhanced uniformity in the diffraction orders of Dammann gratings achieved through the proposed methodology, confirming its efficacy for the fabrication of high-precision DOEs.

Keywords: Diffractive Optical Element (DOE), Thermochemical Laser Writing, Correction of Crossed Diffraction Gratings

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой искусственные двумерные структуры, способные управлять амплитудой и фазой электромагнитного излучения, формируя световые пучки с заданными характеристиками. Их применение охватывает ключевые области современной оптики: интерферометрию, голографию, адаптивные системы и лазерные технологии, где точность микрорельефа ДОЭ напрямую определяет качество экспериментальных данных и функциональность оптико-электронных устройств. Несмотря на широкий спектр методов изготовления ДОЭ, включая лазерное травление, фотолитографию и жидкостное травление, особый интерес вызывает технология прямой лазерной термохимической записи [1-3]. Этот метод основан на локальном нагреве тонкопленочных материалов (например, хрома) [4] лазерным излучением, что приводит к формированию скрытых изображений, преобразуемых в микрорельеф посредством селективного травления [5]. Однако его эффективность ограничена тепловыми искажениями, возникающими из-за нестационарности температурных полей и кинетики химических реакций в процессе записи.

Термохимические искажения [6,7] проявляются в деформациях границ экспонируемых областей, особенно выраженных в зонах включения и выключения лазерного пучка. Эти артефакты связаны с инерционностью нагрева и охлаждения материала, а также с неравномерным распределением энергии в тонкой пленке хрома, что приводит к отклонению геометрии микроструктур от проектных параметров. Последствиями таких искажений являются снижение дифракционной эффективности и уменьшение однородности дифракционных порядков решётки.

Для оптимизации термохимической записи известен ряд подходов [8-10]. В рамках данного исследования для минимизации угловых искажений разработана методика, основанная на коррекции границ экспонируемых зон и формировании «микровыступов» в области угла элемента решётки. Предложенный подход направлен на компенсацию паразитных деформаций за счет локальной модификации топологии поверхности, что обеспечивает повышение точности формирования рельефа скрещенных решёток.

Основная цель настоящей работы заключалась в разработке и апробации метода коррекции для прямой лазерной записи скрещенных решёток [11], в частности дамановского типа [12-14], направленного на улучшение ключевых характеристик, таких как дифракционная эффективность и пространственная однородность дифракционных пучков. При создании дифракционных оптических элементов использовалась круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) CLWS-300IAE. В качестве материала для формирования решёток применялись тонкие хромовые плёнки, обрабатываемые по технологии термохимической лазерной записи.

Метод записи скрещенных решёток

Для создания дифракционных оптических элементов применяется круговая лазерная записывающая система [15,16]. КЛЗС предназначена для прямой лазерной записи амплитудных бинарных микроструктур произвольной геометрии на пленках хрома. Принцип работы КЛЗС состоит в формировании сфокусирован-

ным лучом лазера скрытых изображений в плёнке хрома или другого материала. Запись изображений осуществляется путем пошагового перемещения записывающего лазерного пучка, по радиусу непрерывно вращающейся подложки и синхронной с вращением модуляции мощности пучка под управлением компьютера. Длине волны записи 532 нм.

Экспериментальное исследование искажений

Для исследования корреляционных функций сдвигов границ элементов в зависимости от мощности записывающего пучка были проведены эксперименты с записью тестовых структур, представляющих собой треки с периодически изменяющимся в шахматном порядке периодом записи (рис. 1). Структура, состояла из 10-25 дуговых тестов, каждый из которых, состоял из 5 треков с шагом записи 0.5мкм. Данные структуры были записаны на различных радиусах подложки от 5 мм до 35 мм. Аналитическому изучению подверглись сдвиги граничных областей, локализованные в зонах переходов между структурными элементами.

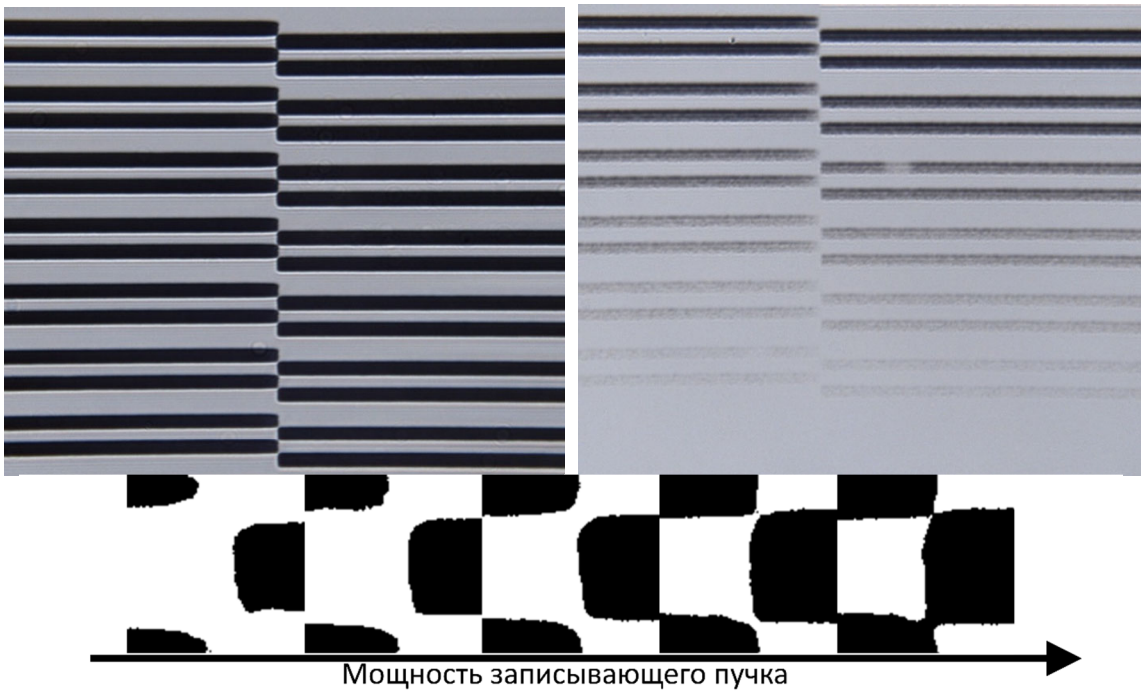


Рис. 1. Тестовых структур для анализа сдвигов границ

Наблюдаемые смещения продемонстрировали два типа пространственных искажений (рис. 2): Сдвиг по направлению сканирования, обусловленный несовпадением точек начала и завершения записи трека, что согласуется с предсказаниями теоретической модели процесса и радиальный сдвиг, связанный с пространственной асимметрией энергетического воздействия пучка, проявляющейся в пулевидной форме трека записи.

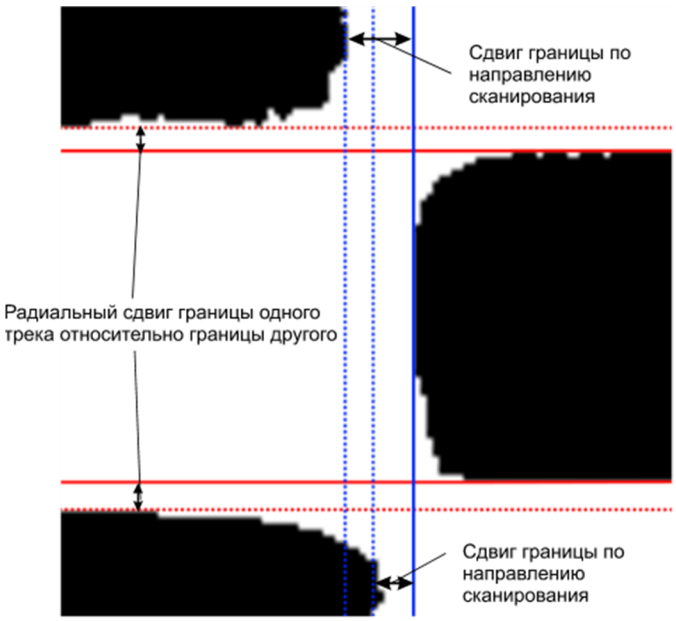


Рис. 2. Сдвиги границ тестовой структуры в начале и конце периода записи

Анализ экспериментальных данных выявили характер корреляций между сдвигами и мощностью: экспоненциальный тренд для смещений по направлению сканирования и линейная корреляция для радиальных смещений границ. (рис. 3).

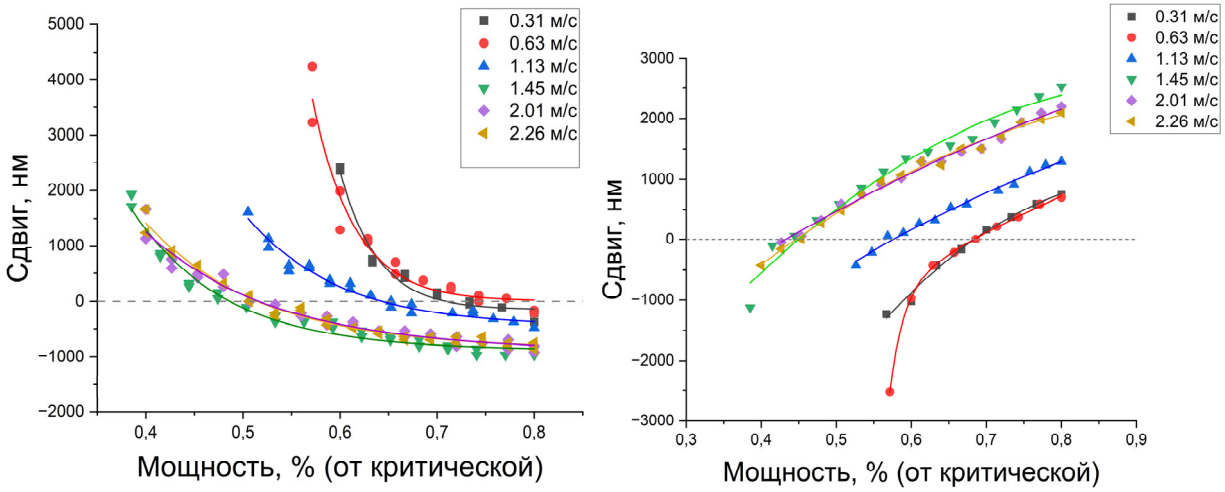


Рис. 3. Зависимости сдвигов границ по направлению сканирования и радиальных от мощности записывающего пучка

Для нахождения зависимости коэффициента соответствия от мощности для различных скоростей сканирования была записана тестовая структура (рис. 4).

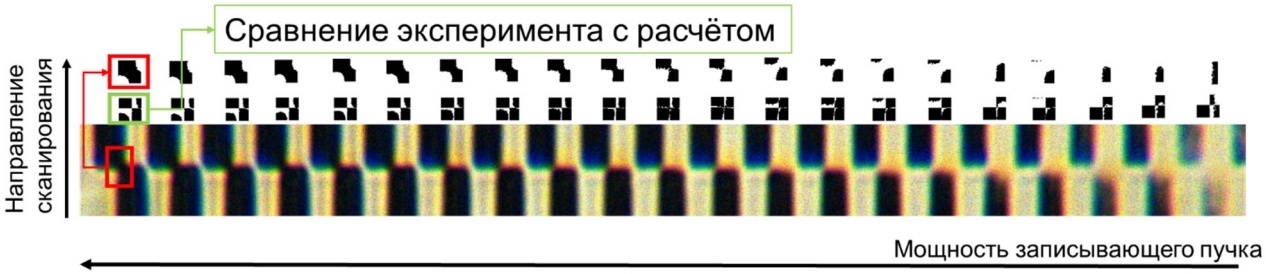


Рис. 4. Тестовая структура для анализа коэффициента соответствия

Коэффициент соответствия – это отношение количество совпадающих пикселей между экспериментальным образцом и теоретической расчётной структурой на общее количество пикселей рассматриваемого участка:

$$f = \frac{N}{S} \tag{5}$$

где f – коэффициент соответствия, S – количество совпадающих пикселей N – общее количество пикселей.

Проведённый анализ зависимости коэффициента соответствия от мощности сканирования (рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что в области повышенных скоростей отсутствует выделенный диапазон мощности, способствующий качественному формированию ДОЭ. Результаты эксперимента указывают на то, что при увеличении скорости сканирования невозможно подобрать оптимальную мощность для записи, что негативно сказывается на качестве получаемых элементов. В связи с этим возникает необходимость применения методов коррекции для улучшения геометрии, что может способствовать достижению требуемых характеристик и повышению стабильности процессов формирования ДОЭ.

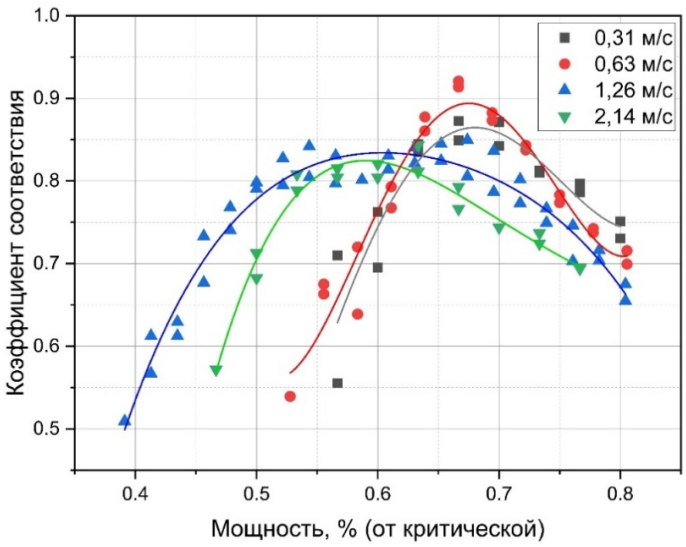


Рис. 5. Зависимость коэффициента соответствия от мощности сканирования

Компенсация искажения углов

Компенсация искажение границ можно реализовать с помощью их смещения в рамках создоваймых проектов для записи [17,18]. Использование данного метода позволит скомпенсировать искажение геометрии, не изменяя условия и характеристики записи, такие как мощность записывающего пучка и скорость сканирования.

Для компенсации искажений углов было предложено создать «микровыступы» на углах элемента. «Микровыступом» в данной работе обозначены дополнительные элементы, расположенные в угловых точках основного элемента, позволяющие скомпенсировать угловые искажения. Размер «микровыступа» зависит от задаваемой коррекции границ и для экспериментальной решётки составляет 200 нм. Однако из-за ограничений установки, заключающиеся в том, что лазерная запись начинается от трёх треков, было решено увеличить размеры квадрата до 400 нм. Далее он был утоплен в элемент на глубину 200 нм для сохранения изначального положения (рис. 6 a).

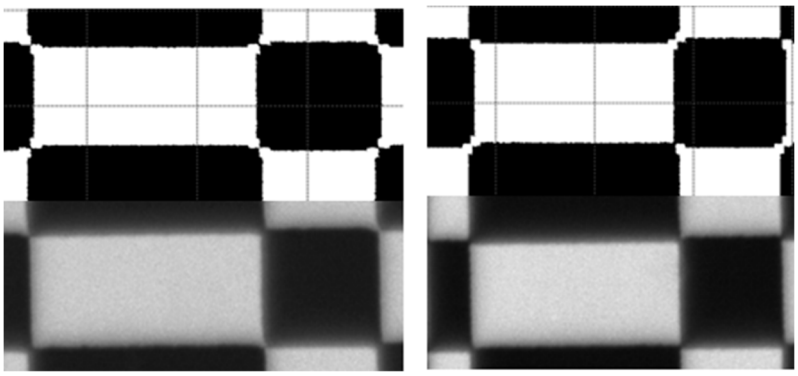


Рис. 6. Расчётный и записанный вид элемент скрещённой решётки a) с четырьмя «Микровыступами» и b) тремя «Микровыступами»

Добавление «микровыступа» позволило скомпенсировать угловые искажения и заострить углы. Однако, после записи тестовой решётки было выяснено, что по направлению записи «микровыступы» образуют перемычку (рис.7 b). Для устранения данного дефекта было предложено не создавать нижний «микровыступ» по направлению записи (рис. 6 b). Это позволило создать элемент с острым углом (рис. 7 c).



Рис. 7. Экспериментальное изображение элементов решётки a)без добавления «микровыступов», b) с четырьмя «микровыступами» и c) с тремя

Для подтверждения метода была проведена экспериментальная запись, в ходе которой выполнено лазерное формирование 34 образцов скрещенных даммановских решёток. Для каждого типа образцов были установлены различные параметры: наличие коррекции, наличие дополнительных «Микровыступов», наличие смещения «микровыступов» относительно угла элемента (рис. 8).

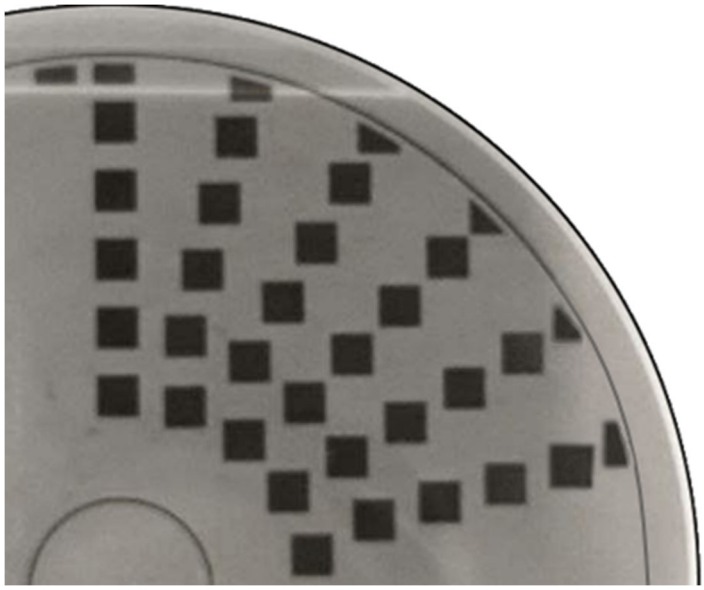


Рис. 8. Тестовая структура для апробирования метода коррекции

Результатом стало измерение среднеквадратичного отклонения дифракционной эффективности 48 порядков дифракции (СКО 48, исключая нулевой порядок) дамманаской решётки (рис. 9) после реактивно-ионного травления микрорельефа через хромовую маску [19]. Наименьшие средние значения СКО 48 продемонстрировали решётки с коррекцией границ на -200 нм, как без дополнительных микровыступов (обозначенные как -200), так и с тремя микровыступами (смещёнными на 50 нм относительно границы, обозначенные как sq3d50). Средние значения СКО 48 составили 8,35% и 8% соответственно для данных вариантов оптимизации. Эти значения на 2% ниже, чем у эталонных образцов без коррекции. Данный результат экспериментально подтверждает эффективность предложенного способа коррекции границ скрещенных дифракционных решеток с использованием «микровыступов».

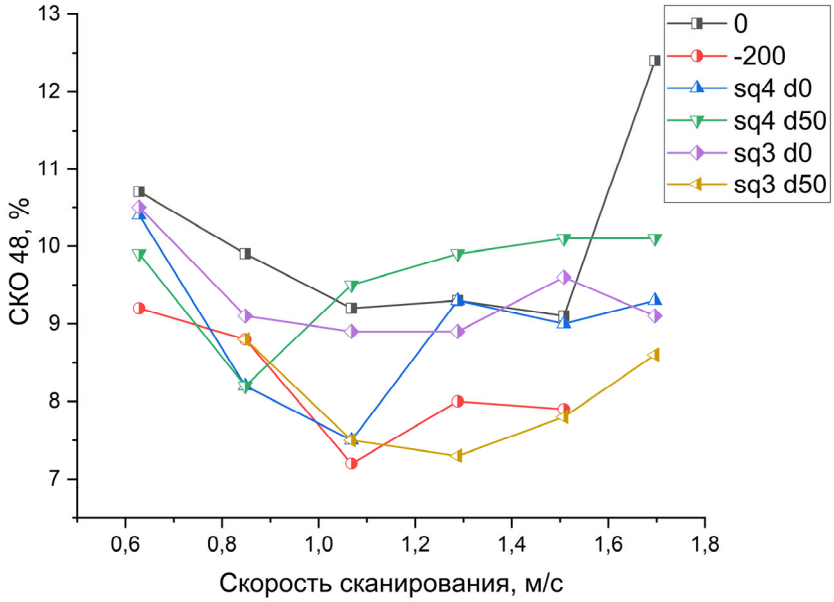


Рис. 9. Среднеквадратичное отклонение 48 дифракционных порядков при различных скоростях сканирования. 0 – структуры без коррекции; -200 – структуры с коррекцией границ без дополнительных «микровыступов»; sq4 d0 – структуры с коррекцией границ с 4 «микровыступами» и 0 сдвигом; sq4 d50 – структуры с коррекцией границ с 4 «микровыступами» и 50 нм сдвигом; sq3 d0 – структуры с коррекцией границ с 3 «микровыступами» и 0 сдвигом; sq3 d50 – структуры с коррекцией границ с 3 «микровыступами» и 50 нм сдвигом

Заключение

Таким образом, в рамках настоящего исследования продемонстрировано влияние термохимических искажений, возникающих в процессе формирования скрещенных дифракционных решёток, а также предложена методика их компенсации. Реализация данной методики способствует улучшению функциональных параметров создаваемых ДОЭ, что повышает их потенциал применения в высокоточных оптических системах.

Проведенное исследование говорит о проблеме необходимости улучшения характеристик и функциональности КЛЗС, поставленной ранее [20].

Благодарности

Исследование финансировалось за счет субсидий на финансовое обеспечение государственного задания (государственный регистрационный номер 124041700107-9). В исследовании использовалось оборудование ЦКП "Спектроскопия и оптика" ИАиЭ СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чурин Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома. Квантовая электроника, –1985 т. 12, № 4 – с. 755-761.

2. Углов А. А. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. – Наука, 1991. – 286 с.

3. В.П.Кирьянов, В.Г. Никитин, «К вопросу о механизме записи изображений в пленках хрома», Автометрия. 2004. – Т. 40, №2. –С. 59-68.

4.Рыбакова В. Ю., Павпертов Д. А. Исследование тонкой пленки хрома, нанесенной на подложку методом магнетронного напыления //Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций. – 2018. – С. 325-327.

5.Коронкевич В. П. и др. Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома //Письма в журнал технической физики. – 1985. – Т. 11. – №. 3. – С. 144-148.

6. Агафонов А. Н., Моисеев О. Ю., Корлюков А. А. Анализ зависимости разрешающей способности технологии локального термохимического окисления от параметров структуры светочувствительной пленки хрома //Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – №. 1. – С. 101-108.

7. Вейко В. П. и др. Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 631-636.

8. Полещук А. Г. и др. Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов //Автометрия. – 2002. – Т. 38. – №. 3. – С. 3-19.

9. Cherkashin V. V. et al. Processing parameter optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films //Diffractive and Holographic Device Technologies and Applications IV. – SPIE, 1997. – Т. 3010. – С. 168-179.

10. Xie N., Jones D., Lopez G. Comprehensive modeling of the lithographic errors in laser direct write //Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2019. – Т. 37. – №. 6.

11.Сергеев С. А., Мешалкин А. Ю., Йову М. С. Дифракционные структуры, сформированные двумя скрещенными наложенными дифракционными решетками //Электронная обработка материалов. – 2020. – Т. 56. – №. 6. – С. 51-60.

12. Jahns J. et al. Dammann gratings for laser beam shaping //Optical Engineering. – 1989. – Т. 28. – №. 12. – С. 1267-1275.

13.Lin J. C. Department of Electrical Engineering and Computer Science //Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems. – 1994. – Т. 2. – С. 129.

14.Krackhardt U., Streibl N. Design of Dammann-gratings for array generation //Optics communications. – 1989. – Т. 74. – №. 1-2. – С. 31-36.

15. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P., Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Applied Optics. – 1999. – V.38. – N 8. – Pp. 1295–1301.

16. Вейко В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г., Синев Д.А., Шахно Е.А. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. I. Изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием // Автометрия. 2017. Т. 53, № 5. С. 66−77.

17. Korolkov, V. P., Sedukhin, A. G., Kuts, R. I., Cherkashin, V. V., Golubtsov, S. K., Malyshev, A. I., & Belousov, D. A. (2022). Analyzing the tolerances on direct laser writing of two-dimensional Dammann gratings and performing the software correction of writing modes. 12318, 123182G.

18. Корольков В.П., Седухин А.Г., Куц Р.И., Саметов А.Р., Малышев А.И., Черкашин В.В. «Дифрактометрический контроль и коррекция структуры компьютерно-синтезированных разветвляющих решеток Даммана на этапе их изготовления» Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2022. Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 22 – 23 сентября 2022 г. Национальная конференция с международным участием «СибОптика-2022. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей»: сб. материалов в 8 т. Новосибирск: СГГА, 2022. – 165 с.: – Т. 8. – № 1. – С. 9-16.

19. Корольков В.П., Малышев А.И., Голубцов С.К., Куц Р.И., Саметов А.Р. Лазерные и вакуумно-плазменные технологии микроструктурирования для задач оптического приборостроения // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 8, № 2. – С. 3–8.

20. V.N. Khomutov, R.V. Shimansky, R.K. Nasyrov, V.P. Korolkov, Principles of operation and prospects for the development of laser lithographic systems for the synthesis of optical elements / // Proceedings of SPIE. – 2021. – Vol. 11875. – P. 118750O.

© А. П. Золоторенко, В. П. Корольков, А. Р. Саметов, В. В. Черкашин, 2025

УДК 535.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-297-300

Д. Е. Капустина[1,2], В. П. Корольков[1]✉, Р. И. Куц[1], А. Р. Саметов[1], С. К. Голубцов[1]

Особенности применения полутоновых хромовых фотошаблонов для формирования микрорельефа многоуровневых дифракционных элементов

[1] Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: victork@iae.nsk.su

Аннотация. Представлены результаты формирования микрорельефа секционированного дифракционного компонента трифокальной интраокулярной линзы в фоторезисте методом контактной фотолитографии с зазором с использованием хромового полутонового фотошаблона.

Ключевые слова: термохимическая лазерная запись, полутоновые фотошаблоны, полутоновая фотолитография, селективное травление

D. E. Kapustina[1,2], V. P. Korolkov[1]✉, R. I. Kuts[1], A. R. Sametov[1], S. K. Golubtsov[1]

Features of the application of halftone chrome photomasks for the formation of microrelief of multilevel diffraction elements

[1]Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: victork@iae.nsk.su

Abstract. The results of formation of microrelief of sectioned diffractive component of trifocal intraocular lens in photoresist by contact photolithography with gap using chromium halftone photomask are presented.

Keywords: thermochemical laser writing, halftone photomasks, halftone photolithography, selective etching

Введение

Массовое производство высокоэффективных многоуровневых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) ограничивается высокой стоимостью и трудоемкостью традиционных методов, таких как прямая лазерная [1-3] или электронно-лучевая запись [4,5] на полимерных резистах. В связи с этим, полутоновая фотолитография [6] представляет собой перспективную альтернативу, сочетающую в себе высокую производительность, экономичность и возможность создания элементов со сложным рельефом.

В данной работе рассматривается применение полутоновой фотолитографии для изготовления многоуровневых ДОЭ в сочетании с термохимической лазерной записью [7,8] на металлических пленках и селективным жидкостным травлением.

Экспериментальные результаты

Для формирования полутоновых фотошаблонов (ПФ) в работе использовалась круговая лазерная записывающая система CLWS300IAE [9]. Для проявления экспонированного микрорисунка использовался селективный травитель, описанный в работе [10].

Оптимальное время травления составило 9 минут, обеспечив максимальный динамический диапазон пропускания (1:2) при изменении мощности записывающего пучка.

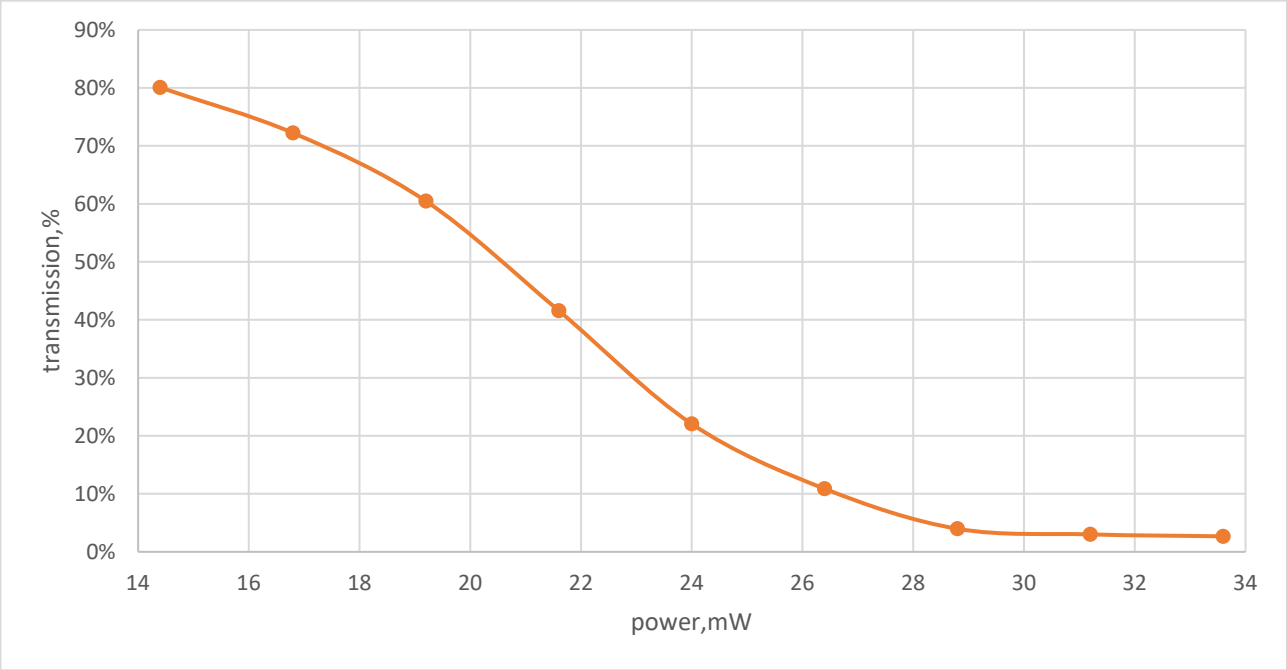
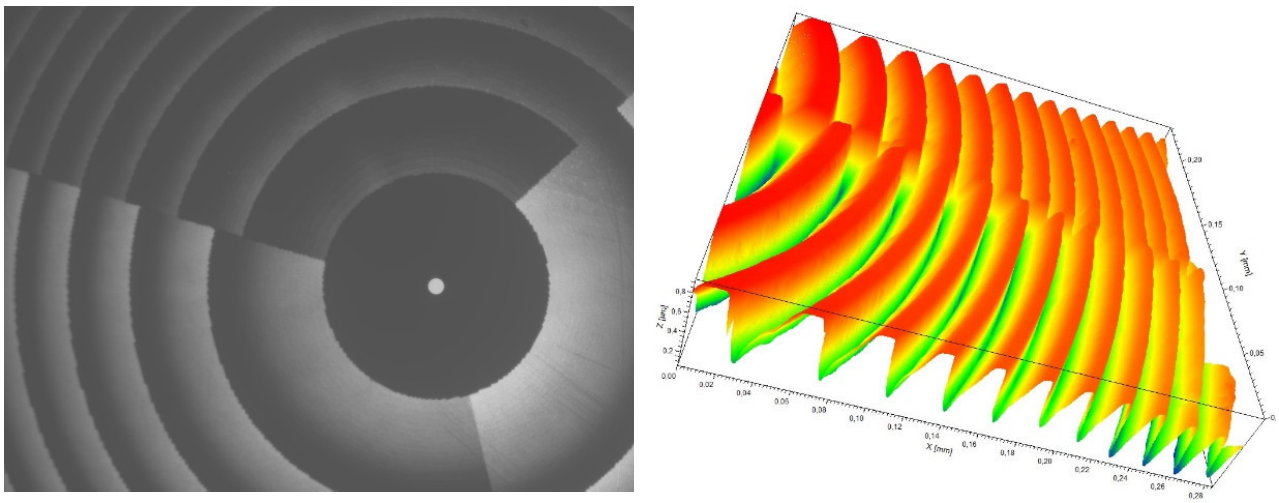


Рис.1. Зависимость пропускания от мощности записывающего пучка при 9-минутном травлении

Методом термохимической лазерной записи был изготовлен полутоновой фотошаблон трехсекционной интраокулярной линзы (рис. 2а), после чего методом контактного экспонирования с зазором и последующим проявлением в щелочном растворе KOH 0,8% был получен его отпечаток в фоторезисте (рис. 2б). Глубина рельефа была оптимизирована для проверки работы фоторезистной линзы в воздушной среде и составила 500 нм для сектора, рассчитанного на работу в красной области спектра. Сглаживание дифракционного рельефа необходимо для интраокулярных гибридных линз и было реализовано за счет зазора при контактной фотолитографии.



а) *б*)

Рис. 2. Микрофотография полутонового фотошаблона дифракционной секционированной интраокулярной линзы *а*) и профилограмма его отпечатка в фоторезисте *б*)

Заключение

Изготовлен полутоновой фотошаблон трехсекционной интраокулярной линзы, изображение которого было перенесено на фоторезист методом контактной фотолитографии с зазором. Сформированный профиль измерен оптическим профилометром. Продемонстрирована возможность применения хромовых полутоновых фотошаблонов для тиражирования дифракционного микрорельефа в фоторезисте.

Благодарности

Исследование финансировалось за счет субсидий на финансовое обеспечение государственного задания (государственный регистрационный номер 124041700107-9). В исследовании использовалось оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gale M.T., Knop K. The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing// Proc. SPIE. – 1983. – Vol.398. – P. 347–353.

2. Gale M. T. Direct writing of continuous-relief micro-optics // Chapter 4 in Micro-optics, H.P. Herzig.– Taylor & Francis.– London, 1996.

3. Korolkov V.P., Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J. Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry// Proc. SPIE. – 2002. – Vol.4900. – P. 873 – 884.

4. Fujita T., Nishihara H., Koyama J. Fabrication of micro-lenses using electron beam lithography// Opt. Lett. – 1981. – Vol.6. – P.613–615.

5. Ekberg M., Nikolaeff F., Larson M., and Härd S. Proximity-compensated blazed transmission grating manufacture with direct-writing, electron-beam lithography // Appl. Opt.– 1994. – Vol.33, N1. – P.103–107.

6. Полещук А.Г. Изготовление высокоэффективных элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и фоторастровой технологий // Автометрия. 1991.– N 6.– С. 66–76.

7. В. П. Коронкевич и др. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома //Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12. – №. 4. – С. 755–761.

8. Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г., Синев Д. А., Шахно Е. А., «Лазерные технологии в микрооптике Ч. 1 изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием», Автометрия. – 2017 – Том 53. - №5 – С.71.

9. Poleshchuk A G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P., Kharissov A.A., Cherkashin V.V., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Verhoglyad A.G. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. – 1999. – Vol. 38. – P. 1295–1301.

10. Cherkashin V.V., Churin E.G., Korolkov V.P. et al. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films// Proc. SPIE. – 1997. – Vol. 3010. – P. 168–179.

© Д. Е. Капустина, В. П. Корольков, Р. И. Куц, А. Р. Саметов, С. К. Голубцов, 2025

УДК 535.417
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-301-303

Ю. Ц. Батомункуев[1,2]✉

Особенности ахроматизации дифракционных оптических систем

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: opttechnic@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются особенности ахроматизации дифракционных оптических систем. Показано, что хроматическая аберрация положения и сферохроматическая аберрация дифракционных систем может быть исправлена оптимальным выбором взаимного расположения дифракционных элементов.

Ключевые слова: хроматическая аберрация, дифракционный оптический элемент, ахроматизация

Yu. Ts. Batomunkuev[1,2]✉

Features of achromatization of diffractive optical systems

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk,
Russian Federation
e-mail: opttechnic@mail.ru

Abstract. This paper examines the features of achromatization of diffractive optical systems. It is shown that chromatic aberration of position and spherochromatic aberration of diffractive systems can be corrected by optimal choice of mutual arrangement of diffractive elements.

Keywords: chromatic aberration, diffractive optical element, achromatization

Известно, что широкому применению на практике дифракционных (голограммных) оптических элементов препятствует их принципиальный недостаток, а именно наличие сильной хроматической аберрации [1]. Как преобразователи световой волны дифракционные оптические элементы используются, как правило, с монохроматическими источниками излучения, тогда как большее применение на практике имеют источники белого света. Ситуация с дифракционными оптическими элементами напоминает ситуацию со светодиодами. До тех пор пока светодиоды излучали монохроматический свет (красный и зеленый), их применение ограничивалось индикацией и освещением в технических устройствах. Тогда как разработка светодиодов белого света позволила массово использовать их в качестве экономичных и практичных источников света. Поэтому задача ахроматизации дифракционных оптических элементов [2-4] с целью расширения областей их практического применения остается актуальной.

В последние годы нами начат цикл работ по ахроматизации как одиночных дифракционных оптических элементов, так и дифракционных систем. Так в [5]

получено, что для ахроматизации одиночного объемного ГОЭ требуется, чтобы он был изготовлен из материала, у которого коэффициент дисперсии обратно пропорционален длине волны света в рабочем диапазоне. В этом случае хроматическая аберрация положения, возникающая из-за дифракции, будет компенсироваться аберрацией из-за дисперсии показателя преломления дифракционного оптического элемента.

В том случае, если дисперсия показателя преломления не позволяет исправить хроматическую аберрацию положения дифракционного оптического элемента, эта аберрация может быть скорректирована другим дифракционным оптическим элементом с обратной дисперсией [6]. Это возможно из-за того, что в противоположных порядках дифракции дисперсия дифракционных оптических элементов имеет разные знаки. На рис. 1 представлен ахроматический дуплет, состоящий из фокусирующего 1 и рассеивающего 2 дифракционных оптических элементов.

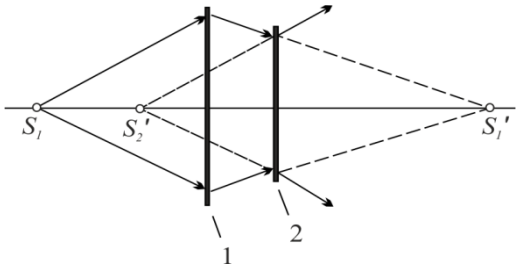


Рис. 1. Схема двухкомпонентного ахроматического дуплета

Суть взаимного исправления хроматических аберраций компонентов заключается в том, что отношение фокусных расстояний компонентов на рабочих длинах волн равно квадрату отношения расстояний от компонентов до плоскости изображения каждого из компонентов.

На рис. 2 представлен фокусирующий ахроматический дифракционный триплет [6] состоящий из одного объемного собирающего ГОЭ по обе стороны от которого расположены рассеивающие ГОЭ 1. Хроматическая аберрация объемного ГОЭ 2 компенсируется хроматическими аберрациями рассеивающих ГОЭ 1.

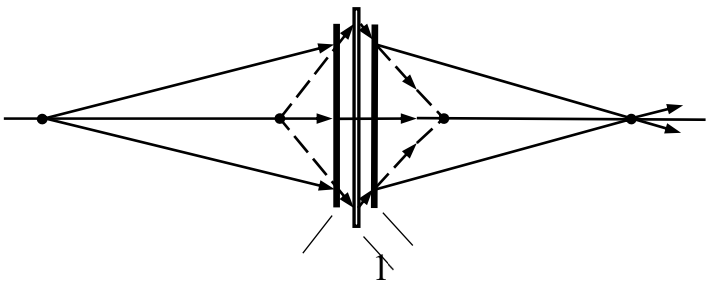


Рис. 2. Схема ахроматического дифракционного триплета

Комбинацией указанных дуплета и триплета могут быть исправлены остаточные хроматические аберрации этой дифракционной системы. В общем случае под исправлением аберраций дифракционного элемента и дифракционной системы подразумевается уменьшение их аберраций до допустимого уровня в заданном рабочем спектральном диапазоне.

Разработанные способы ахроматизации дифракционных оптических элементов и систем применимы в широком диапазоне длин волн, начиная от инфракрасной и заканчивая рентгеновским диапазоном. Остаточную ахроматическую аберрацию дифракционных оптических элементов нужно исправлять не только комбинацией ахроматических дифракционных оптических элементов, но и оптимальным выбором толщин и поперечных размеров с учетом угловой и пространственной селективности. Ахроматические дифракционные системы, несомненно, найдут широкое применение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.

2. Bennet, S. J. Achromatic combinations of hologram optical elements // Applied optics. – 1976. – V. 15, N. 2. – P. 542–545.

3. Sweatt, W. C. Achromatic triplet using hologram optical elements // Applied optics. – 1977. – V. 16, N. 5. – P. 1390–1391.

4. Мустафин, К.С. Расчет ахроматизированных голограммных линзовых систем на основе принципа таутохронизма лучей / К.С. Мустафин // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44, Вып. 1. – С. 164–167.

5. Батомункуев, Ю.Ц. Ахроматизация объемного голограммного оптического элемента. Часть 2 / Ю.Ц. Батомункуев // Сб. междунар. науч. конф. «Сибоптика- 2021»: – Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 8. – С. 220–222.

6. Батомункуев, Ю.Ц. Расчет осевых сферических аберраций высших порядков светосильного фокусирующего ГОЭ с исправленной сферической аберрацией третьего порядка. Часть 2 / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 627–636.

© Ю. Ц. Батомункуев, 2025

УДК 535.417
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-304-307

Ю. Ц. Батомункуев[1,2]✉

Применение объемных голограммных оптических элементов. Часть 4

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: opttechnic@mail.ru

Аннотация. Настоящая работа является продолжением обзорного цикла работ, выполненных автором во время работы в ЦКБ «Точприбор» (г. Новосибирск) и в Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ). В четвертой части работы рассмотрены применения объемных голограммных оптических элементов в различных устройствах с учетом их особенностей.

Ключевые слова: объемные голограммные оптические элементы

Yu. Ts. Batomunkuev[1,2]✉

Application of volume hologram optical elements. Part 4

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: opttechnic@mail.ru

Abstract. This work is a continuation of the review cycle of works performed by the author during his work at the Central Design Bureau "Tochpribor" (Novosibirsk) and the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT). The fourth part of the work considers the use of volume holographic optical elements in various devices, taking into account their features.

Keywords: holographic optical elements

Введение

Отличительные особенности объемных голограммных оптических элементов (ГОЭ), такие как высокая дифракционная эффективность, пространственная, угловая и спектральная селективности, позволяют при их использовании в оптических устройствах не только существенно улучшать их характеристики, но и разрабатывать принципиально новые устройства [1-4]. Указанные отличительные особенности обеспечивают возможность выполнения одним объемным ГОЭ нескольких функций.

Настоящая работа является продолжением обзорной работы [5, 6], в которой рассматриваются применения объемных ГОЭ в различных устройствах.

Использование наложенных объемных ГОЭ в устройствах ввода информации в поле зрения наблюдателя

В 80-х годах прошлого века были предложены разные варианты устройств ввода информации в поле зрения наблюдателя с использованием объемных голограммных оптических элементов. На рис. 1 представлена схема такой установки – схема визуального спектроуказателя. Это устройство, предназначенное для визуального наблюдения спектра излучения, было разработано в соавторстве с Сухановым В. И. и Шойдиным С. А. [7]. В объеме используемого ГОЭ были наложены две голограммы, одна – объемная дифракционная решетка – разлагала падающее излучение в спектр, а вторая голограмма накладывала в поле зрения на полученный спектр изображение шкалы. Таким образом, ГОЭ выполнял две функции, разлагая в спектр видимое излучение и одновременно позволяя определить длины волн спектра излучения.

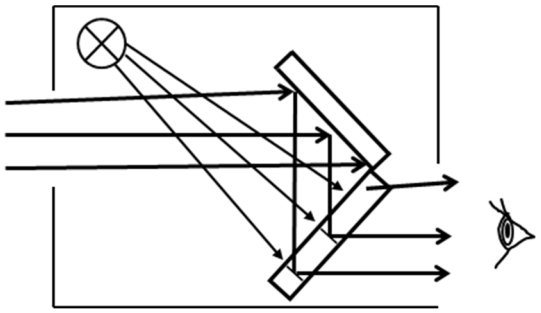


Рис. 1. Визуальный спектроуказатель

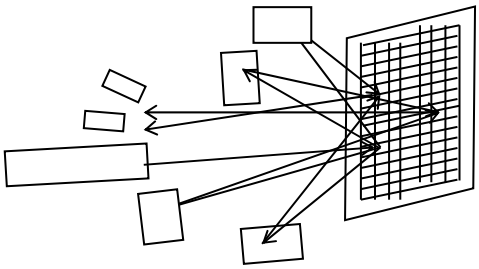


Рис. 2. Двухкоординатный датчик перемещений

Датчик перемещений и положений на основе наложенного объемного ГОЭ

Голограммный оптический элемент в виде объемной двумерной дифракционной решетки может использоваться в качестве шкалы при разработке устройств, позволяющих измерить перемещения в плоскости с погрешностью в несколько нанометров. Эта объемная дифракционная решетка представляет собой сформированные в объеме материала две скрещенные перпендикулярно объемные линейные решетки из повторяющихся модуляций показателя преломления. При использовании ГОЭ в датчике перемещений в объеме решетки формируются две взаимно перпендикулярные интерференционные картины пространственных полос, совпадающих с объемными решетками модуляции показателя

преломления. При взаимном смещении пространственных интерференционных полос относительно объемной дифракционной решетки в дифрагировавших волнах происходит уменьшение и увеличение интенсивности световых волн до первоначального значения при взаимном смещении на один период решетки. Это явление называется многократной дифракцией световой волны на дифракционной решетке и использовалось ранее при разработке датчиков перемещений [8]. На базе этого явления автором вместе с Н. А. Мещеряковым был разработан двухкоординатный датчик перемещений, на который был получен патент на изобретение [9].

Узкополосные фильтры для ИК и видимой области спектра излучения

При создании и применении лазеров в устройствах наблюдения и дальнометрии возникла необходимость создания компактных узкополосных фильтров для выделения и регистрации отраженного лазерного излучения от наблюдаемого объекта. Разработка и использование таких фильтров открывало возможность совмещения визуального и приемного оптических каналов при одновременном уменьшении весогабаритов оптических систем устройств наблюдения и дальнометрии. Достигалось это тем, что в оптической системе размещался голограммный оптический элемент, направляющий на фотоприемник отраженное излучение от объекта наблюдения. При этом естественный свет беспрепятственно должен был проходить через оптическую систему.

Одним из вариантов создания узкополосных спектральных фильтров было изготовление объемных ГОЭ в виде объемных решеток, отражающих когерентное излучение видимого диапазона электромагнитного спектра. В ГОИ имени Вавилова был выполнен цикл работ по разработке полимерных светочувствительных материалов, позволяющих изготовить отражающие объемные решетки толщиной до 3 мм с требуемыми техническими характеристиками [10, 11]. Технологические трудности [12, 13] при изготовлении этих объемных решеток были преодолены, и достигнута относительная дифракционная эффективность выше 99 %.

Применение внеосевых объемных ГОЭ

Относительно высокая пространственная и угловая селективность объемных ГОЭ может быть использована для разработки голограммных оптических систем из составных внеосевых объемных ГОЭ [14]. Особенность внеосевых объемных ГОЭ заключается в произвольном расположении плоскостей предмета и изображения. Используя эту особенность и пространственную селективность объемного ГОЭ, можно создать составные ГОЭ, существенно улучшающие технические характеристики устройств. Так, составной объемный ГОЭ может обеспечивать наблюдение только выбранных участков поля зрения наблюдения. Также он может принимать модулированный оптический сигнал только на определенной длине волны и направлять его на фотоприемное устройство. Внеосевые объемные ГОЭ перспективны в использовании в качестве составных оптических элементов в волоконной и в адаптивной оптике.

Заключение

Таким образом, в статье приведен краткий обзор некоторых работ, выполненных автором во время работы в ЦКБ «Точприбор» (г. Новосибирск) и Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ). Часть работ выполнялась в соавторстве с сотрудниками СГУГиТ. Некоторые идеи выполненных работ, например, обеспечение многофункциональности используемых объемных ГОЭ в рассматриваемых устройствах, могут быть применены и в новых разработках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Опт. и спектр.– 1963. –Т. 15, вып. 4.– С. 522–532.
2. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
3. Ган, М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
4. Батомункуев, Ю.Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов / Монография // СГУГиТ. – Новосибирск, 2020. – 195 с.
5. Батомункуев, Ю.Ц. Применение объемных голограммных оптических элементов. Часть 1 / Ю.Ц. Батомункуев // Сб. материалов Международной научной конференции «СИБОПТИКА-2022». Новосибирск: СГУГиТ, – 2022. – Ч.1. – С. 22–26.
6. Батомункуев, Ю.Ц. Применение объемных голограммных оптических элементов. Часть 3 / Ю.Ц. Батомункуев // Сб. материалов Международной научной конференции «СИБОПТИКА-2024». Новосибирск: СГУГиТ, – 2024. – Ч.1. – С. 3–7.
7. Батомункуев Ю.Ц., Шойдин С.А., Суханов В.И. О возможности создания визуального спектроуказателя светящихся тел на основе объемной голографической решетки // Тез. докл. Всесоюз. конференции “Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов”.– Барнаул. – 1991. – С. 115–116.
8. Патент РФ на изобретение № 2400703. Двухкоординатный датчик перемещений / Ю. Ц. Батомункуев, Н. А. Мещеряков. Заявка № 2009103470. Приоритет от 02.02.2009. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 27.09.2009.
9. Суханов В.И., Лашков Г.И., Петников А. Е., Ащеулов Ю.В. Трехмерная голограмма на реоксане как узкополосный спектральный селектор // Письма в ЖТФ. –1984. –Т. 10, № 15. – С. 925–928.
10. Попов А. П., Гончаров В. Ф., Вениаминов А. В., Любимцев В. А. Высокоэффективные узкополосные спектральные селекторы // Опт. и спектр. – 1989.– Т.66, вып. 1. – С. 3–4.
11. Батомункуев Ю. Ц. Особенности перекачек энергии при записи объемного ГОЭ в динамической среде // Мат. Междун. конф. ”Соврем. проблемы геодезии и оптики“. Часть 2. – Новосибирск, 2003. – С. 219–221.
12. Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А. Стабилизация интерференционных полос при записи объемной голограммы в реальном времени // Автометрия. – 2000. –№ 1. – С. 50–56.
13. Батомункуев Ю.Ц., Дианова А.А., Маганакова Т.В., Райхерт В.А., Харитошин Н.А. Компьютерный синтез пленочных составных и наложенных дифракционных элементов / Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 139–142.

© Ю. Ц. Батомункуев, 2025

УДК 535.8
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-308-312

В. И. Наливайко[1]✉, М. А. Пономарева[1], Ю. Ц. Батомункуев[2]

Формирование кольцевого изображения с помощью пленочного аксикона с предельно большим фокусным расстоянием

[1] Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Аннотация. Предложена и экспериментально апробирована методика получения кольцевых изображений с помощью пленочных аксиконов в тандеме с линзами. Измерены диаметры колец в оптической схеме линзакона с линзами, имеющими различные фокусные расстояния. Параксиальные лазерные пучки на выходе пленочного аксикона фокусируются линзами вблизи их фокусных плоскостей, при этом диаметры колец увеличиваются с ростом фокусных расстояний линз.

Ключевые слова: пленочный аксикон, халькогенидные слои, линзакон

V. I. Nalivaiko[1]✉, M. A. Ponomareva[1], Yu. Ts. Batomunkuev[2]

Formation of ring image using film axicon with extremely long focal length

[1] Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Abstract. A method for obtaining ring images using film axicons in tandem with lenses is proposed and experimentally tested. The diameters of the rings in the optical scheme of a lensacon with lenses having different focal lengths are measured. Paraxial laser beams at the output of a film axicon are focused by lenses near their focal planes, and the diameters of the rings increase with the growth of the focal lengths of the lenses.

Keywords: film axicon, chalcogenide layers, lensacon

Введение

В пространстве за аксиконом условно можно выделить две зоны, каждая из которых имеет свое применение (рис. 1). Ближняя зона начинается сразу за аксиконом. В этой области аксикон генерирует узкий протяженный фокусный отрезок. В дальней зоне за аксиконом формируются кольца [1–5].

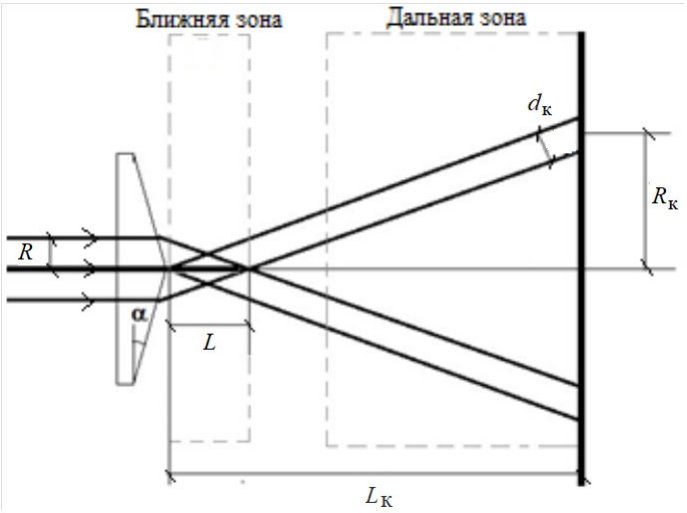


Рис. 1. Принципиальная схема преобразования плоского волнового фронта на входе аксикона в фокусный отрезок в ближней зоне и в кольцевое изображение в дальней зоне за аксиконом

Для формирования и применения круговых изображений на близком расстоянии от аксикона применяют аксиконы с большими углами α порядка 20º и короткими фокусными отрезками L. Для формирования предельно длинных фокусных отрезков L угол α аксикона уменьшают до величины, которую может обеспечить выбранная технология. Формулы для расчета длины фокусного отрезка L и радиуса колец $R_к$ на расстоянии $L_к$ от аксикона приведены в [6, 7].

При создании объемных и дифракционных аксиконов различного типа анализируют в основном поведение фокусных отрезков, а параметрам кольцевого изображения в дальней оптической зоне уделяется меньше внимания [3]. Все потребители аксиконов прекрасно знают, что определяющими атрибутами аксиконов являются наличие фокусного отрезка в ближней зоне, а в дальней зоне – кольцевого изображения. При применении пленочных аксиконов с предельно большими по величине фокусными отрезками [4, 5] из-за секундных углов между интерферирующими оптическими лучами, формирующими фокусный отрезок в ближней зоне и кольцевое изображение – в дальней зоне, возникают трудности обнаружения кольцевых изображений из-за их малых размеров и большой удаленности от аксикона. В связи с этим у потребителей возникают сомнения в корректности формирования бесселевых пучков с помощью пленочных аксиконов. В этом случае от изготовителей аксиконов требуется разработка методики экспериментального подтверждения формирования бесселевых пучков пленочным аксиконом. Целью настоящей работы является апробация такой методики и демонстрация полученных с ее помощью результатов.

Методы и материалы

Максимальная толщина слоев As_2S_3 в центре аксиконов варьировалась от 0,4 до 10 мкм. Подложки для напыления изготавливались из оптического кварца или

оксидного стекла К-8. Для аксиконов с толщиной в центре конуса до 10 мкм использовались подложки из материалов CaF_2 или BaF_2, имеющие близкие по величине коэффициенты линейного расширения с напыляемым материалом, что исключало растрескивание слоев в процессе хранения и эксплуатации аксиконов.

Предлагаемая нами оптическая схема для экспериментального подтверждения наличия кольцевого изображения, формируемого исследуемым аксиконом, представляет собой тандем аксикона и линзы, так называемый линзакон (рис. 2).

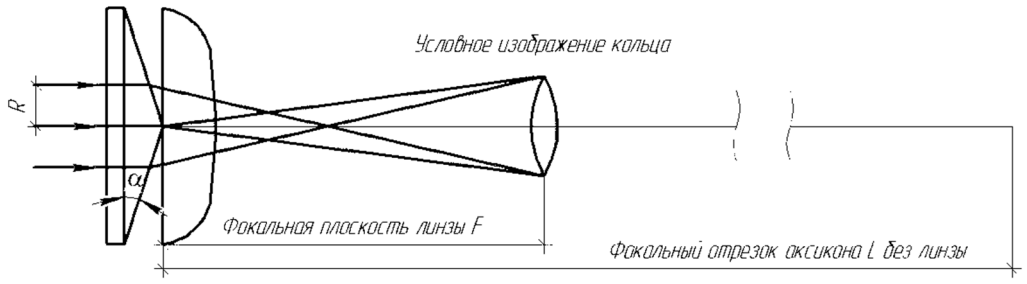


Рис. 2. Линзакон с пленочным аксиконом и сменной линзой

С помощью такого линзакона, в котором можно заменять линзы с различными фокусными расстояниями, получаем изменение диаметра сфокусированного кольцевого изображения в широких пределах. При этом кольцевое изображение приближается к аксикону и фокусируется вблизи фокусной плоскости линзы.

Результаты

Экспериментальные исследования проводились с пленочными аксиконами толщиной в центре конуса, равной 1 мкм. Для получения оптических систем типа линзокон применялись две сменные положительные линзы с фокусными расстояниями F, равными 1 м и 2 м. Полупроводниковый лазер с рабочей длинной волны $\lambda = 640$ нм, расширителем пучка и коллиматором использовались в качестве источника излучения с плоским волновым фронтом. Измеренные диаметры сфокусированных колец приведены в табл. 1.

Таблица 1

Радиусы колец двух линзоконов

Название способа	Фокусное расстояние линзы F, м	Диаметр кольца, мм
Способ 1	1,0	3,5
Способ 2	2,0	7,1

Из приведенных в табл. 2 результатов видно, что кольцевое изображение наибольшего диаметра получается с помощью линзы, имеющей фокусное расстояние $F = 2{,}0$ м. Уменьшение диаметра кольца в два раза происходит при замене линзы на линзу с фокусным расстоянием $F = 1{,}0$ м. При этом сфокусиро-

ванное изображение кольца формируется вблизи фокальной плоскости линзы, которая в два раза ближе к аксикону.

Видно, что при формировании кольцевых изображений в центре кольца отсутствует изображение осевого фокусного пучка света, что характерно для дальней зоны, где не происходит формирование фокусного отрезка (рис. 3). Таким образом, мы приближаем кольцевое изображение практически из бесконечности (более 90 метров), фокусируя его вблизи фокусной плоскости линзы на расстоянии 1 или 2 метра.

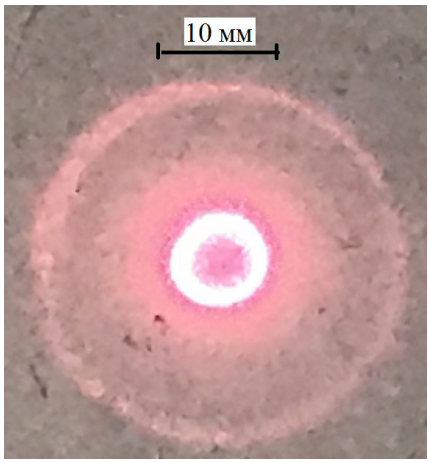


Рис. 3. Сфокусированное кольцевое изображение, полученное с помощью тандема пленочного аксикона и линзы с фокусным расстоянием $F = 2{,}0$ м вблизи ее фокальной плоскости

Обсуждение

Технология изготовления пленочных аксиконов имеет ряд преимуществ перед дифракционными, в частности в том, что отсутствует необходимость формирования скачков фазы оптических пучков на границах зон. Размытые границы зон являются источниками паразитного рассеяния и потерь эффективности преобразованных пучков света. У пленочных аксиконов отсутствуют эти источники потерь. Компьютерное управление процессом напыления, разработанное и апробированное в работе, выполненной в ИАЭ СО РАН, обеспечивает повторяемость режимов нанесения слоев термическим испарением и стабильность характеристик получаемых пленочных аксиконов. Однако, наша рабочая технология напыления пленочных аксиконов требует еще более высокой точности при совмещении центра маски с центром вращения подложки.

Заключение

Экспериментально подтверждено, что пленочный аксикон функционально работает нормально, формируя кольцевое изображение в дальней зоне за фокусным отрезком. Радиусы колец в сфокусированном виде можно изменять с помощью положительных оптических линз, отличающихся фокусными расстояниями.

У аксиконов с большими по величине фокусными отрезками (десятки метров) сфокусированные кольцевые изображения удобно формировать с помощью оптических линз с небольшими фокусными расстояниям F порядка одного или двух метров, таким путем приближая кольцевые изображения к аксикону.

Рассмотренная методика может быть предложена потребителям пленочных аксиконов для оценки их качества.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки № гос. рег. 121022000126-9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Parigger C., Tang Y., Plemmons D. H., Lewis J. W. L. Spherical aberration effects in lens-axicon doublets: Theoretical study // Appl. Opt. 1997. 36, N 31. P. 8214-8221.
2. Koronkevich V. P., Mikhaltsova I. A., Churin E. G., Yurlov Yu. I. Lensacon // Appl. Opt. 1993. 34, N 25. P. 5761-5772
3. Казанский Н.Л., Хонина С. Н. Анализ эффектов непараксиальности в линзаконных оптических системах // Автометрия.2017. Т. 53, № 5, С. 78–89.
4. Наливайко В.И., Пономарева М.А., Колдаев А.Е. Оптические аксиконы, полученные вакуумным напылением // Междун. научн. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018», 23-27 апреля 2018 г., Новосибирск: Национал. науч. конф. «СИБОПТИКА-2018»: сб. материалов в 2 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 2. – С. 16–23.
5. Наливайко В.И., Пономарева М.А. Формирование оптических аксиконов с максимальными фокусными отрезками // Автометрия, 2020, Т. 56, № 4, С. 89 – 94.
6. Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевы пучки. – М. Физматлит, 2012. – 408 с.
7. Weber N., Spether D., Seifert A., Zappe H. Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultraminiaturized multi-micro-axicon systems // J. Opt. Soc. Am. A. – 2012. – V.29 – P.808–816.

© В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, Ю. Ц. Батомункуев, 2025

УДК 535.417
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-313-317

Ю. Ц. Батомункуев[1,2]✉, В. И. Наливайко[3]

Расчет аберраций дифракционного аксикона

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3] Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: opttechnic@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена аберрация уширения светящегося тонкого кольца, являющегося изображением точки схождения сферической волны, падающей на толстый дифракционный аксикон. Представлены расчетные зависимости этой аберрации уширения от периода и радиуса кривизны штрихов дифракционного аксикона. Показано, что выбором оптимального радиуса дифракционной структуры аксикона и расстояния от аксикона до плоскости наблюдения можно уменьшить ширину светящегося кольца до дифракционных размеров.

Ключевые слова: дифракционный аксикон, аберрации аксикона

Y. T. Batomunkuev[1,2]✉, V. I. Nalivaiko[3]

Calculation of aberrations of the diffraction axicon

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
Novosibirsk, Russian Federation
[3] Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: opttechnic@mail.ru

Abstract. The paper considers the aberration of the broadening of a luminous thin ring, which is an image of the convergence point of a spherical wave incident on a thick diffraction axicon. The calculated dependences of this broadening aberration on the period and radius of curvature of the diffraction axicon lines are presented. It is shown that by choosing the optimal radius of the diffraction structure of the axicon and the distance from the axicon to the observation plane, it is possible to reduce the width of the luminous ring to diffraction sizes.

Keywords: diffraction axicon, aberrations of the axicon

В настоящее время оптический элемент аксикон [1, 2] применяется в разных оптических устройства, например, в оптических устройствах контроля для увеличения глубины резкости изображения [3], в лазерных нивелирах для задания круговой линии в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Формирование ширины кольцевого распределения интенсивности световой волны, прошедшей через аксикон, задается поперечными размером падающей плоской световой волны. Для этой цели были предложены дифракционные и голографические аналоги фокусирующих и рассеивающих рефракционных аксиконов в виде прозрачной пластины с сформированными на ее поверхности или в объеме радиальных

модуляций толщины, коэффициента поглощения или показателя преломления, в виде концентрических окружностей [4]. В ряде задач наблюдения требуется формирование узкого кольцевого распределения световой волны [5] и ввода в поле зрения наблюдателя [6]. Достичь этого можно использованием сходящейся на аксикон световой волны с одновременным уменьшением толщины кольцевого распределения интенсивности, формируемого дифракционным аксиконом. Но уменьшению толщины светящегося кольца препятствуют аберрации дифракционного аксикона. Известным недостатком тонкого дифракционного аксикона является наличие множества порядков дифракции, тогда как толстый дифракционный аксикон имеет один порядок дифракции. Поэтому целью настоящей работы является рассмотрение зависимостей аберраций толстого дифракционного аксикона от периода и радиуса кривизны штрихов аксикона.

Особенности формирования изображений толстым дифракционным аксиконом

Толстый дифракционный аксикон представляет собой прозрачную пластину, в объеме которой сформирована дифракционная микроструктура в виде концентрических колец (обручей) с общим центром, как показано на рис. 1. При перпендикулярном падении на толстый дифракционный аксикон сходящейся или расходящейся монохроматической световой волны дифрагировавшие волны имеют один дифракционный порядок (рис. 2), в котором распространяется соответственно сходящаяся или расходящаяся световая волна с коническим волновым фронтом. При падении на толстый дифракционный аксикон осевой сходящейся (расходящейся) световой волны дифрагировавшая сходящаяся (расходящаяся) коническая волна формирует действительное (мнимое) изображение точечного источника S_0 в виде светящейся окружности. Дифрагировавшая расходящаяся волна формирует вдоль оптической оси аксикона фокальный отрезок, в дифрагировавшей сходящейся волне фокальный отрезок отсутствует.

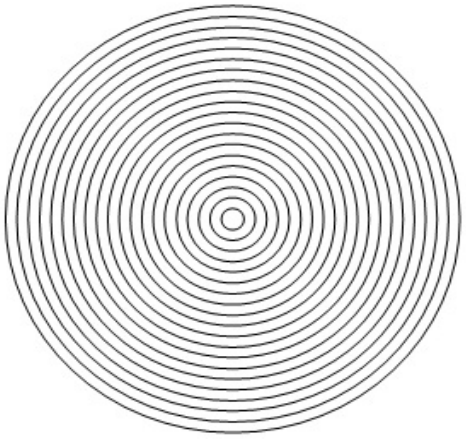


Рис. 1. Дифракционный аксикон

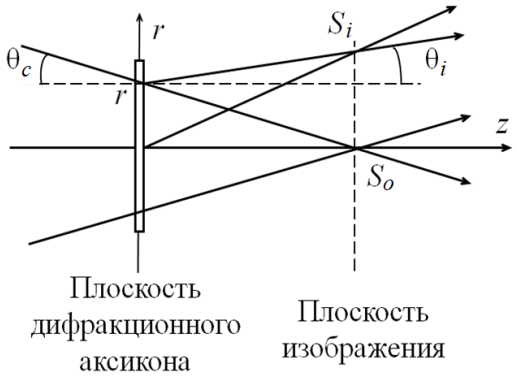


Рис. 2. Формирование изображения точечного источника S_o

Расчет аберраций дифракционного аксикона

Расчет монохроматических аберраций рассмотрим на примере толстого дифракционного аксикона, на который падает сходящаяся световая волна. Предполагается, что аксикон находится в однородной среде с показателем преломления, равным среднему показателю преломления аксикона. Расчет аберраций выполнен лучевым методом из условия локального максимума интенсивности дифрагировавших узких пучков света на дифракционном аксиконе. Дифракционный аксикон считается состоящим из маленьких локальных дифракционных решеток. Сходящаяся сферическая волна предполагается состоящей из узких сходящихся пучков световой волны. Для формирования изображения S_i точки схождения S_o волны на каждой локальной решетке дифракционного аксикона должно выполняться условие максимума интенсивности дифрагировавшего узкого пучка световой волны

$$d(\sin\theta_c + \sin\theta_i) = \lambda, \qquad (1)$$

где d – период локальной дифракционной структуры аксикона; θ_c, θ_i – локальные углы падения и дифракции узких световых пучков; λ – длина световой волны в среде.

Ширина Δr светящейся окружности в плоскости наблюдения равна

$$\Delta r = r + z_i(\operatorname{tg}\theta_i - \operatorname{tg}\theta_{oi}) \qquad (2)$$

где z_i – расстояние от аксикона до плоскости наблюдения изображения S_i; θ_{oi} – локальный угол дифракции светового пучка, падающего вдоль оптической оси аксикона.

На рис. 3а), 3б) и 3в), 3г) представлены расчетные зависимости ширины Δr и радиуса r_i светящейся окружности от изменения радиуса r кривизны и периода d дифракционной структуры аксикона. Получено, что для длины волны λ = 532 нм при расстояниях z_c = 0,7 м и z_i = 0,695 м значения аберрации уширения Δr светящегося кольца не превышают 18 мкм для диаметра дифракционного аксикона D = 24 мм.

Дифракционное уширение Δr светящегося тонкого кольца, сформированного дифракционным аксиконом, может быть оценено из условия

$$\Delta r \approx \frac{\lambda z_i}{D},$$

где D – диаметр дифракционного аксикона. При длине волны λ = 532 нм, расстоянии z_i = 0,7 м и диаметре аксикона D = 24 мм дифракционное уширение светящегося кольца равно $\Delta r \approx$ 15 мкм. Относительное отверстие такого дифракционного аксикона составляет 1:30.

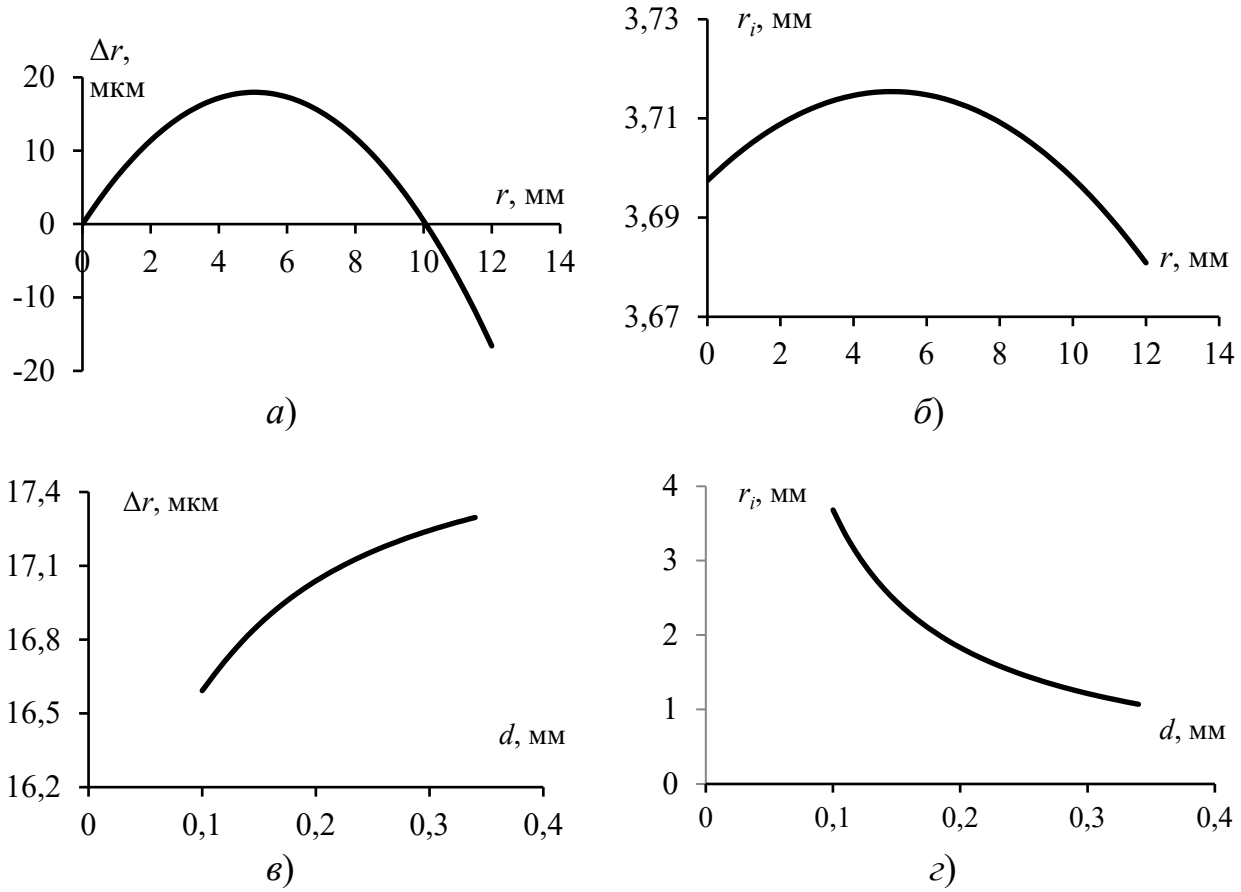


Рис.3. Расчетные зависимости ширины Δr и радиуса r_i светящейся окружности от изменения радиуса r кривизны и периода d дифракционной структуры аксикона

Таким образом, показано, что толстый дифракционный аксикон формирует безаберрационное внеосевое изображение точки схождения сферической волны в виде светящейся тонкой окружности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mcleod J.H. The acxicon: a new type optical element // JOSA. 1954. – N. 44. – P. 592.
2. Наливайко В. И., Пономарева М. А. Формирование оптических аксиконов с максимальными фокусными отрезками // Автометрия – 2020. – Т. 56, № 4. – С. 89 – 94.
3. Хонина С. Н., Савельев Д. А., Применение аксиконов в изображающих системах для

увеличения глубины фокуса // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. – N. 13(6). – С. 7–15.

4. Davidson N., Friesem A. A., Hasman E. Holographic axilens: High resolution and long focal depth // Opt. Lett. 1991. – 16. Is. 7. – P. 523–525.

5. Пальчикова И. Г. «Бездифракционные пучки» и их каустики // Компьютерная оптика. – 1996. – № 16. – С. 35–39.

6. Батомункуев Ю. Ц. Разработка и расчет объемных голографических оптических элементов // Монография. – Новосибирск. – СГУГиТ. – 2020. – С. 195.

© Ю. Ц. Батомункуев, В. И. Наливайко, 2025

УДК: 681.785.552
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-318-324

С. Н. Былин[1], В. В. Лубский[1]✉

Применение дифракционного элемента в качестве разветвителя в оптической модели связи

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vvl0777@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию применения полимерной рельефной решетки в качестве оптического разветвителя при передаче сигналов через оптический волновод. Определена величина деполяризации световой волны, прошедшей через оптический волновод.

Ключевые слова: дифракционная решетка, оптический разветвитель

S. N. Bylin[1], V. V. Lubsky[1]✉

Application of a diffractive element as a splitter in an optical communication model

[1]Siberian State University of Telecommunications and Information Science,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vvl0777@mail.ru

Abstract. This work is devoted to the study of the use of a polymer relief grating as an optical splitter when transmitting signals through an optical waveguide. The value of depolarization of a light wave passed through an optical waveguide is determined.

Keywords: diffraction grating, optical splitter

Введение

Дифракционный оптический элемент представляет собой пропускающую или отражающую пластинку с тонким фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции [1]. Современные методы электронно-лучевой литографии и нанофотоники позволяют создавать миниатюрные решетки с субволновыми периодами, открывая возможности для их интеграции в чипы и квантовые устройства. С появлением волоконно-оптических технологий и систем спектрального уплотнения (WDM) в 1980-х годах дифракционные решетки нашли новое применение в телекоммуникациях [2,3]. Они стали сердцем демультиплексоров, разделяющих десятки световых каналов в одном волокне, что обеспечило экспоненциальный рост пропускной способности интернет-магистралей.

Параллельно с демультиплексорами дифракционные решетки начали использовать и в оптических разветвителях, хотя их роль здесь принципиально иная. Если демультиплексоры избирательно разделяют сигналы по длине волны, то разветвители равномерно распределяют оптическую мощность между не-

сколькими выходами без спектральной селективности [4]. Такие устройства стали ключевыми элементами пассивных оптических сетей (PON), где один сигнал от центрального узла делится между десятками абонентов. Однако в гибридных решениях, например, WDM-разветвителях, дифракционные решетки комбинируют обе функции: они разделяют сигнал по каналам, а затем распределяют их по отдельным ветвям, что особенно востребовано в гибридных сетях GPON/XGS-PON.

Конструкции разветвителей могут быть различными, например, сварными, с расщеплением пучка зеркалами, с вращающимися зеркалом, на основе дифракционной решетки (рис.1) [5].

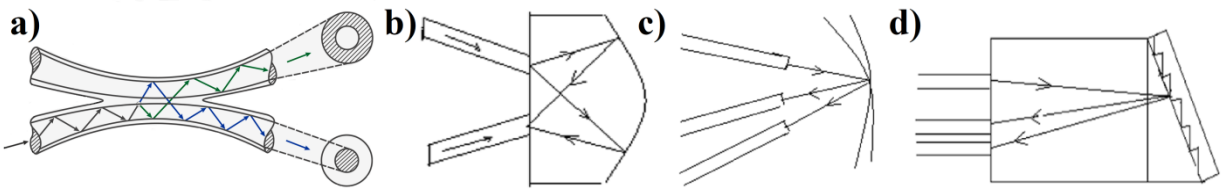


Рис. 1. Оптические разветвители: сварной (a), с неподвижным зеркалом (b), с подвижным зеркалом (c), с дифракционной решеткой (d)

Благодаря совершенствованию технологий нанесения периодических структур, разветвители на основе дифракционных решеток достигли высокой эффективности и миниатюризации. Это позволило интегрировать их не только в магистральные линии, но и в потребительское оборудование, например, модули для дата-центров или компактные сенсоры. В последние годы возрос спрос на компактные и экономичные дифракционные разветвители. Цель данной работы – исследовать возможность использования недорогих полимерных дифракционных решеток с рельефной структурой в качестве эффективных разветвителей.

Экспериментальная часть

Разработанная и изготовленная модель оптико-электронного устройства, предназначенного для передачи аудио сигналов через оптический канал с использованием дифракционного разветвителя, представлена на рис. 2. Структурная схема этой установки показана на рис. 3.

Устройство включает следующие электрические компоненты.

1) Блок питания устройства, состоящий двух независимых источников (АКБ 2) и обеспечивающий стабильное напряжение для всех компонентов. Для питания предусилителей и усилителя 2 применены три последовательно соединенных литий-ионных аккумулятора емкостью 2500 мА · ч каждый, формирующие общее напряжение 11,1 В. Усилитель 1 и Bluetooth-модуль питаются от отдельного литий-ионного аккумулятора (3,7 В, 2500 мА · ч, АКБ 1) через повышающий DC-DC преобразователь, стабилизирующий напряжение до 5 В.

2) Bluetooth модуль, XY-BT-MINI-770, служащий для беспроводной передачи аудиосигнала со смартфона на систему по протоколу Bluetooth 4.1, частота 2,4 ГГц, скорость передачи до 1 Мбит/с. Модуль преобразует аналоговый аудиосигнал в цифровой формат и передает его через UART- интерфейс.

3) Встроенный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), обеспечивающий восстановление аналогового сигнала для дальнейшей обработки. Усилитель 1 на базе биполярного транзистора КТ816А p-n-p, работающий в режиме класса А, обеспечивает линейное усиление аудиосигнала с минимальными искажениями. Статический коэффициент передачи по току более 25, обратный ток коллектора не более 0,1 мА, максимальный ток коллектора 3 А.

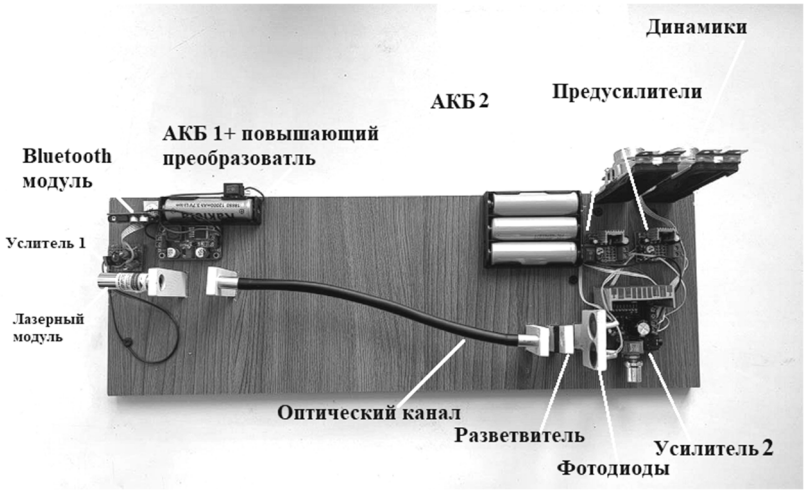


Рис. 2. Модель устройства передачи аудио сигналов

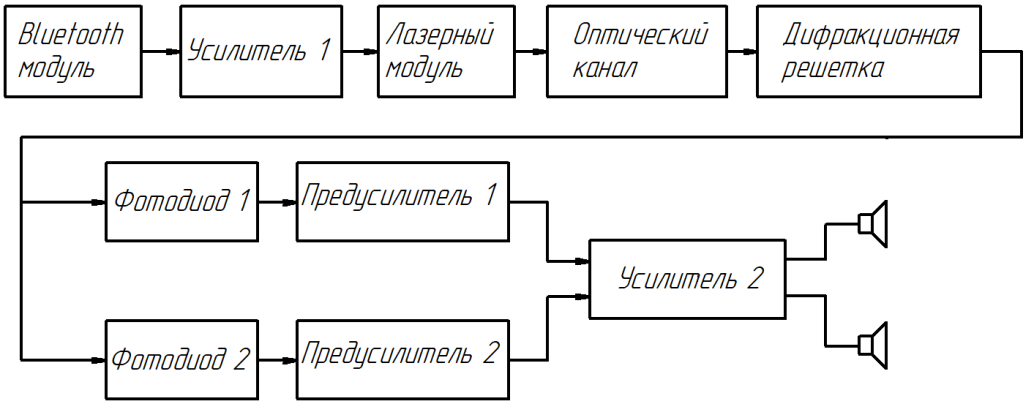


Рис. 3. Структурная схема модели устройства передачи аудио сигналов

4) Предусилитель, представленный одноканальным модулем усиления мощности на микросхеме TDA2030A. Предназначен для усиления слабого сигнала с фотодиода. Максимальная выходная мощность 18 Вт, Питание 6-12 В.

5) Усилитель 2, представленный модулем на микросхеме TDA7297. Модуль имеет два канала по 15 Вт каждый, питание 9-12В, амплитудно-частотная

характеристика захватывает весь слышимый диапазон 20-20000 Гц, рабочий ток 2 А, выходное сопротивление 4 Ом, размер платы 53 х 50 х 41 мм.

6) Для воспроизведения аудиосигналов использовались два динамика Y2898-01 4 Ом 5 Вт.

Оптическая система устройства включает в себя следующие компоненты.

1) Точечный лазерный модуль со стабилизацией тока, предназначенный для преобразования электрического сигнала в модулированное оптическое излучение. Лазерный диод, с длиной волны λ = 650 нм, мощностью 5 мВт и максимальным током 40 мА (питание 3-5 В), работает в режиме прямой модуляции. Размер лазерного модуля 36х12 мм. Внешний вид представлен на рис. 4.



Рис. 4. Точечный лазерный модуль

2) Оптический канал, представленный волноводом, состоящим из множества оптических волокон. Внешний вид оптического волновода показан на рис. 5. Особое внимание уделялось углу ввода излучения в волокна, который составлял 15° – это значение было выбрано для минимизации потерь на вводе сигнала в оптический волновод.

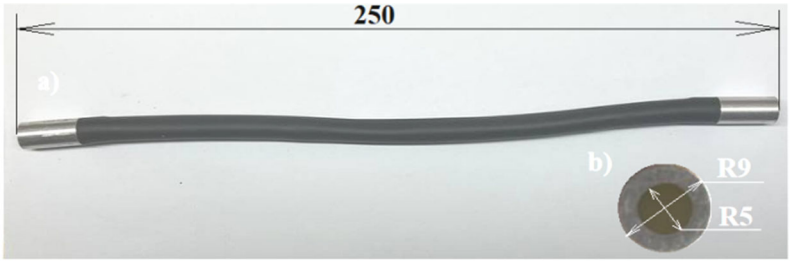


Рис. 5. Оптический волновод, фронтальная сторона (a), вид с боку (b)

3) Дифракционный элемент в виде рельефной решетки, предназначенной для распределения интенсивности лазерного излучения между двумя каналами.

4) Два фотодиода ФД-24К, предназначенные для преобразования дифрагировавшего оптического излучения на дифракционном элементе в

электрический сигнал. Темновой ток не более 2,5 мкА, область спектральной фоточувствительности 0,4-1,1 мкм.

Для определения количественных характеристик рельефной решетки была собрана оптическая система, включающая лазерный модуль с длиной волны $\lambda = 520$ нм, решетку и экран, расположенный на расстоянии $L = 16$ см от решетки. Лазерный луч, падающий перпендикулярно на решетку, формировал на экране дифракционную картину с четко выраженными максимумами (рис. 6). Измеренное отклонение первого порядка (m=1) составило $y = 9{,}7$ см. В первом приближении рельефная решетка может быть представлена в виде тонкой дифракционной решетки. Согласно уравнению главных максимумов интенсивностей тонкой дифракционной решетки, при периоде решетки d, угле отклонения φ дифрагировавшей световой волны, был найден период тонкой решетки, равный $d \approx 1 \cdot 10^{-6}$ м, а количество штрихов на миллиметр составило $N \approx 1000$.

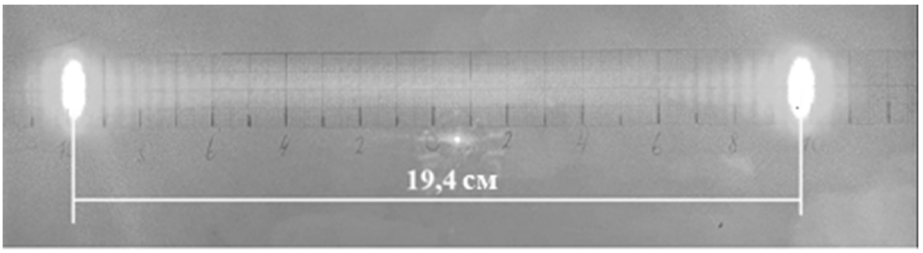


Рис. 6. Дифракционная картина с четко выраженными максимумами интенсивности

Для регистрации дифракционных максимумов в модели устройства, фотодиоды размещались на экране, расположенном на расстоянии L_1=15 мм от решетки. Линейное отклонение луча x в первом порядке определялось из соотношения (1)

$$x = L_1 \cdot \mathrm{tg}(\varphi_1), \qquad (1)$$

где угол дифракции φ_1=40,5°, а отклонение x=12,8 мм.

В ходе проведения измерений линейное отклонение луча первого порядка на дифракционной картине (рис. 7) составило x=12 мм±1 мм. Погрешность обусловлена ограниченной точностью измерительной системы.

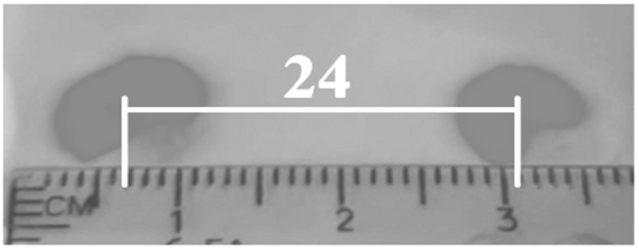


Рис. 7. Дифракционная картина

Для оценки влияния поляризационных эффектов на передачу оптического сигнала был проведен ряд экспериментов с использованием поляризатора. Измерения выходного сигнала проводились с помощью фотодиода ФД-24К, регистрирующего мощность излучения через выходное напряжение в трех ключевых конфигурациях: лазер-поляризатор-фотодиод (первое подключение); лазер-поляризатор-волокно-фотодиод (второе подключение); лазер-волокно-поляризатор-фотодиод (третье подключение). Результаты эксперимента показали значительную зависимость эффективности передачи от поляризационного состояния лазерного излучения. При первом подключении напряжение на фотодиоде варьировалось от 0,01 до 0,28 В, в зависимости от угла поворота поляризатора, показывая высокую степень поляризации лазерного излучения (P=93%), тогда как без поляризатора выходное напряжение стабильно составляло 0,32 В. При втором подключении диапазон регистрируемых напряжение составил 0,01 – 0,17 В, что также демонстрирует высокую степень поляризации (P=80%). При третьем подключении диапазон регистрируемых напряжений составил 0,08 – 0,12 В, что соответствует снижению степени поляризации до P=20%, при отсутствии поляризатора значение напряжение на фотодиоде достигало 0,24 В.

Заключение

Разработана и изготовлена модель оптико-электронного устройства, интегрирующая лазерные модули, фотодиоды и усилители, доказала возможность интеграции таких решений в устройства связи и передачи аудиосигналов через оптический канал с использованием дифракционного разветвителя. Экспериментально подтверждена эффективность использования дифракционного элемента в виде полимерной рельефной решетки в качестве оптического разветвителя для передачи аудиосигналов. Получена высокая степень деполяризации с 93% до 20% после прохождения лазерного излучения по оптическому каналу. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования полимерных рельефных решеток в качестве недорогих дифракционных элементов для гибридных систем, обеспечивающих спектральное разделение и распределение сигналов. Такие решения представляют особый интерес для GPON/XGS-PON сетей, дата-центров, портативной электроники, а также беспилотных летательных аппаратов, где критически важны энергоэффективность, компактность и малый вес оптических компонентов.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Батомункуеву Юрию Цыдыповичу за ценные замечания и консультации, а также за поддержку при выполнении работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Настас А. М., Иову М. С. Исследование влияния глубины рельефа на дифракционную эффективность отражающей и пропускающей рельефно-фазовых дифракционных решеток //Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 7. – С. 133-134.

2. Наливайко В. И., Пономарева М. А. Анализ характеристик волноводного устройства для объединения внешних оптических пучков //Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 1. – С. 95-99.

3. Расчет дифракционного поля в слоистой среде, освещаемой через фазовую маску / А. Б. Сотский, С. О. Парашков, В. И. Соколов, Л. И. Сотская // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121, № 6. – С. 983-994. – DOI 10.7868/S0030403416120254. – EDN XGWCDN.

4. Базакуца П.В., Боев М.А., Никитин А.И. Исследование спектральных характеристик оптических разветвителей // Фотон-экспресс. 2019. №ВКВО. URL: https://cyberleninka.ru/srticle/n/issledovanie-spektalnvh-harakteristik-opticheskih-razvetviteley (дата обращения: 02.05.2025).

5. Оптические компоненты и системы [Электронный ресурс] // XDW. – URL: https://xdw.ru/rubrics/27/ (дата обращения 01.05.2025).

6. Оптические разветвители: что это и где применяется [Электронный ресурс] // Компонент ЛТД. – URL: https://componentltd.ru/technical inforamation/articles/opticheskie-razvetviteli-chto-eto-i-gde-primenyaetsya/ (дата обращения 01.05.2025).

© С. Н. Былин, В. В. Лубский, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-325-329

В. С. Крылов[1]✉

Информационно-измерительная система термостатирования помещений для лабораторий геометрических измерений

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: krulov@sniim.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного испытания информационно-измерительной системы термостатирования лабораторных помещений. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки современных подходов к выполнению работ по прослеживаемости при передаче размеров геометрических величин. Показано, что использование беспроводных каналов передачи данных между термометрами, контроллером, дисплеем и возможными другими компонентами системы позволяет как свободное изменение конфигурации комнаты (расположение рабочих зон), так и защиту передаваемых данных.

Ключевые слова: измерения, термостабилизация, помещения, геометрические величины, информационно-измерительная система

V. S. Krylov[1]✉

Information and measuring system for room temperature control for geometric measurements laboratory

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: krulov@sniim.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive test of an information and measuring system for laboratory room temperature control. The relevance of the work is due to the need to develop modern approaches to performing traceability work when transferring the dimensions of geometric quantities. It is shown that the use of wireless data transmission channels between thermometers, controller, display and possible other components of the system allows both freely changing the room configuration (location of work zones) and protection of transmitted data.

Keywords: measurements, thermal stabilization, premises, geometric quantities, information and measuring system

Введение

Современные требования к точности эталонных приборов предполагают повышенные требования к стабильности испытательного оборудования и условий проведения поверки, а также передачи единицы длины средствам измерений (СИ) по рангу ниже в поверочной схеме [1]. Стандарты, разработанные ранее, предъявляют жесткие требования к помещениям, в которых выполняются работы по передаче СИ геометрических величин [2]. Однако, на сегодняшний день, выполнить современные требования, зачастую, не представляется возможным, в первую очередь, из-за старения помещений, систем их обеспечения.

Методы и материалы

В целях обеспечения температурного режима в специализированных лабораториях геометрических измерений для метрологических целей, где осуществляется передача единицы длины концевым мерам длины, была поставлена задача разработки системы термостабилизации для повышения точности измерений [3, 4]. К системе были предъявлены следующие требования:

– температура окружающего воздуха (20±0,3) °С;

– скорость изменения температуры не более 0,3 °С/ч.

Для решения задачи были проанализированы различные способы и системы поддержания температурного режима в помещениях, но все они имели свои недостатки [5–7]. Сравнительный анализ нескольких возможных решений позволяет выявить оптимальный вариант.

Использование системы стабилизации температурного режима в рабочем помещении, основанной на предложениях патента на изобретение (РФ №RU2545126C1, 2015 год), не предусматривает возможность формирования равномерного температурного поля в рабочей зоне. Другой вариант системы управления температурным режимом в помещении предполагает наличие воздушных потоков с заданными параметрами, которые направляются на объект (патент на изобретение РФ № RU2210703C2, 2023 год), но для многих специальных измерений направленное движение воздуха недопустимо. Еще одним вариантом температурной стабилизации помещений для метрологических видов работ может быть решение на основе теплового баланса кондиционеров (патент на изобретение РФ №RU2478766 C2, 2013 год), которое имеет значительную инерционность и не успевает обеспечивать необходимый режим при резком изменении температурного поля или энергопотребления.

На момент постановки задачи помещение для измерений имело следующую конфигурацию: внутренняя комната построена из кирпича внутри помещения. Она была оснащена кондиционером. Внешняя комната обогревалась центральным отоплением – трубами без радиаторов и кондиционером.

Результаты

Для решения задачи были проведены измерения температурного поля внутренней комнаты лаборатории с помощью датчиков термоизмерителя ТМ-12 [8], одновременно выполняющего измерения и регистрацию температуры окружающего воздуха в 12 точках и с дискретностью по времени 30 с. Погрешность каждого канала измерителя ТМ-12 не превышает 0,05 °С. Таким образом, удается зафиксировать температурное поле в помещении и в рабочей зоне эталонов геометрических средств измерений [9].

Было предложено оснастить буферное пространство (или так называемый внешний контур) мощными промышленными кондиционерами сплит исполнения, а саму внутреннюю термокомнату оснастить системой вентиляции с канальными нагревателями, вентиляторами и воздушными диффузорами. Применение

современного оборудования для формирования и стабилизации температурного поля позволило решить многое проблемы, указанные выше.

Было предложено для термостатирования помещения применить систему автоматического регулирования температуры воздуха. Комплектация системы состоит из:

– двух цифровых датчиков температуры, расположенных в зоне измерений и обеспечивающих дистанционную передачу данных;

– контроллера, который формирует управляющий сигнал для режима работы вентиляционной установки;

– вентиляционная установка, состоящая из канального вентилятора и электрического канального нагревателя.

Поступающий из буферного пространства воздух передается в рабочее пространство через камеру статического давления, а направление воздушного потока вдоль поверхности задается диффузорами.

Высокая степень однородности скорости потока воздуха и его температурного поля обеспечивается щелевыми линейными диффузорами специальной конструкции. Увеличения интенсивности перемешивания воздушных масс в потоке можно добиться размещением системы дефлекторов, но в нашем случае они не понадобились.

Все элементы системы (их мощности, количество и другие необходимые характеристики) были рассчитаны специально под геометрию комнаты. В среде расчетов и визуализации тепловых потоков были подобраны места установки цифровых датчиков температуры, диффузоров и их конфигурация. Так же для минимизации скорости воздушного потока в рабочей зоне применены принципы эффекта Коанда [10]. Обтекание воздушным потоком с температурой отличной от среды по границе раздела – так называемое прилипание потока к стенам и потолку.

Особенностью предлагаемого термостатированного помещения для измерений является несколько использованных технических решений:

– цифровые датчики температуры, расположенные непосредственно в зоне измерений, обеспечивают точное измерение температурного поля именно в рабочей зоне;

– дистанционная передача данных позволяет реализовать высокую скорость передачи информации в управляющий блок;

– использование вентиляционной установки обеспечивает оперативное изменение температурного поля для компенсации возмущающего воздействия, что снижает динамические ошибки поддержания температуры;

Отдельно несколько слов следует сказать о специальных цифровых датчиках температуры – высокоточных термометрах с малой постоянной времени, поскольку именно этот элемент системы обеспечивает оперативность ее реакции.

Термометр имеет особенность подачи измеряемого окружающего воздуха на цифровой сенсор при помощи вентилятора, установленного в корпусе, а также минимизацию времени отклика на изменение температуры за счет обдува миниатюрного цифрового сенсора окружающим воздухом. Калибровка термометров

осуществлялась в климатической прецизионной камере, обеспечивающей стабильность температуры на уровне единиц милликельвинов и получение единиц температуры от малогабаритного термометра – эталона первого разряда.

Информационное взаимодействия устройств в системе обеспечивается следующим образом. Цифровые термометры передают информацию по беспроводному каналу контроллеру. Контроллер осуществляет регулирование канальным нагревателем по заложенному в него пропорционально-интегрально-дифференциальному закону (ПИД регулирование) [11]. Настройка ПИД регулятора осуществляется в момент наладки системы и перед ее аттестацией. В схеме взаимодействия реализовано распознавание отправителей по уникальному адресу отправителя контроллером, что обеспечивает информационную безопасность и отсутствие несанкционированного доступа к контроллеру.

Для удобства отслеживания оператором параметров в реальном времени предусмотрена передача копии экрана контроллера на монитор, расположенный на рабочем месте оператора измерений. Выносной монитор также обеспечивает контроль требуемых параметров (как градиента температуры, так и скорости изменения температуры).

Предложенная информационно-измерительная система термостатирования помещений была аттестована в соответствии с программой аттестации, где подтверждены требуемые характеристики [12].

Данная система является автоматической и работает без настройки оператора. Наличие безынерционных цифровых термометров позволяет масштабировать систему термостатирования для больших помещений. При увеличении объема комнаты можно наращивать количество таких термометров, подстроить конфигурацию диффузоров и вентиляционной установки и обеспечивать поддержание температурного режима для сколь угодно больших помещений.

Заключение

Методы и элементы разработанной информационно-измерительной системы являются защищенными результатами интеллектуальной деятельности, в отношении которых оформлены патенты. Использование беспроводных каналов передачи данных между термометрами, контроллером, дисплеем и возможными другими компонентами системы позволяет, как свободно менять конфигурацию комнаты (расположение рабочих зон), так и защищать передаваемые данные с использованием зашифрованного, скрытого канала связи с проприетарным протоколом обмена [13–15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.12.2018 г. № 2840 об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм.

2. ГОСТ Р 8.000–2023 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к поверочным установкам. – Москва : Стандартинформ, 2023. – 45 с.

3. ГОСТ 9038–90 Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия – Москва : ИПК Издательство стандартов.1990 – 14 с.

4. МИ 1603–87 Государственная система обеспечения единства измерений. Меры длины концевые плоскопараллельные. Общие требования к методикам поверки. – Москва : Стандартинформ, 2023. – 15 с.

5. Лобко В. П. Система поддержания температурного режима в помещении // Патент № 2545126 Российская Федерация, МПК F24F 3/00 (2006.01).: № 2013157021/12: заявл. 23.12.2013: опубл. 27.03.2015. – 19 с.

6. Т. МЕТЕР ХОЛДИНГ Б.В. (NL) Способ регулирования температуры в климатической камере и климатическое устройство // Патент № 2210703: заявл. 13.08.1999: опубл. 27.05.2003. – 2 с.

7. Волынцев А. Б. Ощепков А. Ю. Калинин С. П. Термостатированное помещение для работы высокоточного измерительного оборудования // Патент № 2478766: заявл. 29.06.2011: опубл. 10.04.2013. – 8 с.

8. Крылов В. С. Построение малобюджетных информационно-измерительных систем и систем автоматического регулирования на базе прецизионного многоканального измерителя температуры «Термоизмеритель ТМ-12» // Интерэкспо ГЕО Сибирь. IV Междунар. науч. конгр. – Новосибирск: СГГА, 2008. – Т. 4. – № 2. – С. 141 –144.

9. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые многократные измерения. Методы обработки результатов измерений. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 36 с.

10. Эффект Коанда. [Электронный ресурс]. – URL: http://ru.ruwiki.ru/wiki/Эффект_Коанда.

11. ПИД регулятор. [Электронный ресурс]. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/ПИД-регулятор.

12. ГОСТ Р 8.568–2017 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

13. Проприетарный протокол [Электронный ресурс]. – URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/enru.ru.a5959e156847362184cb645174722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Proprietary_protocol.

14. ГОСТ Р 8.654–2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения.– Москва : Стандартинформ, 2019. – 11 с.

15. МИ 3566–2016 Государственная система обеспечения единства измерений. Типовая методика испытаний и подтверждения соответствия (сертификации) программного обеспечения средств измерений. – Москва : ФГУП «ВНИИМС», 2016 – 44 с.

© В. С. Крылов, 2025

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-330-335

В. С. Крылов[1]✉, И. Д. Карпов[2]

Анализ стабильности аналоговых сигналов силы тока и переменного напряжения, а также фиктивной мощности в устройстве генерации испытательных воздействий

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Акционерное Общество «Радио и Микроэлектроника»,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: krulov@sniim.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования стабильности параметров генератора испытательных сигналов РЕТОМ-51 с применением статистического метода трех сигм (3σ). Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки современных подходов к оценке стабильности комплексных сигналов, включающих параметры силы тока, напряжения и фиктивной мощности, что критически важно для обеспечения достоверности поверочных процедур. Исследование продемонстрировало, что генератор РЕТОМ-51 обладает высокой стабильностью выходных характеристик, полностью соответствуя требованиям к эталонным источникам сигналов для поверки оборудования высокого класса точности. Применение метода 3σ-анализа позволило объективно оценить динамику изменения параметров при различных нагрузочных режимах, исследовать температурную зависимость характеристик и подтвердить соответствие оборудования нормативным требованиям. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о пригодности РЕТОМ-51 для проведения высокоточных испытаний и открывают новые возможности для совершенствования методик метрологического контроля. Разработанный подход демонстрирует высокую эффективность и может быть рекомендован для внедрения в практику поверочных лабораторий.

Ключевые слова: стабильность сигналов, статистический анализ, контроль качества сигналов, метрология, испытательные воздействия

V. S. Krylov[1]✉, I. D. Karpov[2]

Analysis of stability of analog current and alternating voltage signals, as well as apparent power in a test signal generation device

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2] JSC "Radio i Mikroelektronika", Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: krulov@sniim.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive stability analysis of the RETOM-51 test signal generator using the three-sigma (3σ) statistical method. The study addresses the growing need for advanced evaluation techniques of complex signal stability parameters, including current, voltage, and apparent power characteristics, which are critical for ensuring the reliability of verification procedures. The investigation confirmed that the RETOM-51 generator demonstrates exceptional output stability, fully meeting the requirements for reference signal sources in high-accuracy calibration systems. The 3σ-method enabled objective assessment of parameter dynamics under various load conditions, temperature dependence analysis, and compliance verification with regulatory standards. The obtained results conclusively demonstrate the RETOM-51's suitability for precision testing applica-

tions and create new opportunities for enhancing metrological control methodologies. The developed approach shows high effectiveness and can be recommended for implementation in calibration laboratory practice, offering improved reliability for electrical measurement verification processes. The findings are particularly relevant for metrology specialists and test equipment developers working with high-precision measurement systems.

Keywords: signal stability, statistical analysis, signal processing, metrological assurance, test signals

Введение

Современные требования к точности электроизмерительных приборов выдвигают повышенные требования к стабильности испытательного оборудования. Особое значение приобретает комплексная оценка стабильности аналоговых сигналов, включая параметры силы тока, переменного напряжения и фиктивной мощности, что является критически важным для обеспечения достоверности поверочных процедур.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к оценке стабильности многофункциональных генераторов испытательных сигналов. Особое внимание уделяется анализу взаимного влияния различных параметров выходных сигналов и их изменению в процессе длительной эксплуатации оборудования.

Целью работы является комплексное исследование стабильности выходных параметров устройства РЕТОМ-51 производства компании «Динамика» для определения возможности его использования в качестве эталонного источника в поверочных схемах высокого класса точности [1]. В рамках исследования решаются следующие задачи:

– разработка методики оценки стабильности амплитудных и частотных характеристик генерируемых сигналов;

– анализ динамики изменения параметров при различных нагрузочных режимах;

– исследование температурной зависимости характеристик выходных сигналов;

– оценка соответствия полученных результатов требованиям нормативной документации [2].

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов анализа стабильности комплексных сигналов, включающих как силовые, так и мощностные характеристики. Практическая ценность исследования определяется возможностью использования разработанных методик при поверке и калибровке электроизмерительного оборудования [3], что позволяет повысить точность и достоверность измерений.

Особое внимание в работе уделено анализу таких ключевых параметров как:

– долговременная стабильность амплитуды силы тока;

– постоянство величины переменного напряжения;

– воспроизводимость фазовых характеристик;

– динамика изменения фиктивной мощности.

Результаты исследования представляют значительный интерес для специалистов в области метрологического обеспечения и разработчиков испытательного оборудования.

Методы и материалы

Стабильность аналоговых сигналов характеризуется их способностью сохранять заданные параметры во времени и при изменении внешних условий. Для количественной оценки стабильности используются следующие показатели: относительная стабильность амплитуды, изменения фиктивной мощности, статистические параметры обработки измерений. Анализ факторов нестабильности и их влияние на измеряемые параметры приведен в табл. 1.

Таблица 2

Фактор	Влияние на параметры	Методы компенсации
Температурный дрейф	Изменение сопротивления, емкости	Термостабилизация
Старение компонентов	Долговременный дрейф параметров	Периодическая калибровка
Электромагнитные помехи	Искажение формы сигнала	Экранирование
Нестабильность питания	Флуктуации амплитуды	Стабилизированные источники

В данном исследовании применялся современный подход к оценке стабильности параметров, сочетающий программную обработку данных с классическим статистическим анализом [4]. Суть метода заключалась в следующем: специализированное программное обеспечение непрерывно фиксировало значения выходных сигналов (напряжение, ток, мощность) с высокоточных измерительных приборов с интервалом 1 с в течение 5–8 мин. Для каждого параметра рассчитывались среднеквадратичные значения (RMS) на скользящем интервале, что позволило получить репрезентативную выборку данных (300-500 точек измерения для каждого параметра). В качестве оценочной характеристики результата использовалось правило «трех сигм».

Данный подход обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами контроля стабильности.

Высокая точность обеспечивается использованием RMS-значений вместо мгновенных измерений, что исключает влияние кратковременных помех и выбросов.

Объем выборки (300 точек) обеспечивает статистическую достоверность и надежность результатов анализа по критерию 3σ.

Динамический контроль (скользящее окно измерений) позволяет выявлять даже незначительные временные дрейфы параметров.

Программная реализация исключает субъективные ошибки оператора.

Особенно важно, что применение правила трех сигм к полученным данным позволяет не только констатировать факт нестабильности, но и количественно оценить:

– степень отклонения параметров;

– характер распределения погрешностей (случайный или систематический);

– динамику изменения стабильности во времени.

Такой подход превосходит традиционные методы периодического контроля по точечным измерениям, обеспечивая более полную и объективную картину поведения устройства в рабочих условиях.

Результаты

Исследование проводилось на базе стандартной поверочной схемы для комбинированных датчиков тока и напряжения производства компании «РиМ» [5]. В качестве эталонных средств измерений 2-го разряда использовались: трансформатор тока ТЛЛ-0,66.2 (класс точности 0,02), нормирующий измерительный преобразователь НЛЛ-10, многофункциональный измеритель Энергомонитор-61850.

Для воссоздания полной поверочной схемы дополнительно применялись: образцовый источник напряжения НОЛ-08.10, эталонный преобразователь РЕТ-10.

Особенностью проведенного анализа стало применение современного программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего: непрерывную регистрацию параметров с частотой 1 Гц в течение 5–8 мин, автоматический расчет среднеквадратичных значений (RMS).

Среднеквадратичные значения параметров определялись для:

– действующего значения напряжения;

– действующего значения тока;

– мгновенной мощности.

Результат статистической обработки данных по критерию 3σ приведены в табл. 2 для приборов учета высоковольтных интеллектуальных РиМ 384 и в табл. 3 для датчиков тока и напряжения комбинированных РиМ КДТН [6].

Таблица 2

№	Ток от $I_{ном}$	Угол φ, °	Активная мощность, Вт			Реактивная мощность, вар		
			ср. зн.	3σ	выброс	ср. зн.	3σ	выброс
1	$I_{макс}$	0	477502,3	39,8	нет	2688,2	0,3	нет
2	1	60	62431,7	5,2	нет	100738,5	8,4	нет
3	1	90	3709,3	0,3	нет	118463,2	9,9	нет
4	$I_{макс}$	14	463779,7	38,7	нет	113928,6	9,5	нет
5	1	30	104452,4	8,7	нет	56009,3	4,7	нет
6	1	323	96843,4	8,1	нет	68332,2	5,7	нет
7	0,05	0	5972,6	59,7	нет	30,2	0,3	нет
8	0,02	323	1904,4	19,0	нет	1443,6	14,4	нет
9	0,01	240	6235,4	62,4	нет	10118,5	101,2	нет
10	0,02	90	12,8	0,1	нет	2387,8	23,9	нет
11	0,1	30	10458,9	104,6	нет	5644,1	56,4	нет
12	0,05	166	11444,4	114,4	нет	3205,4	32,1	нет

Таблица 3

№	Ток от $I_{ном}$	Напряжение от $U_{ном}$	Угол φ, °	Напряжение, В			Сила тока, А		
				ср. зн.	3σ	выброс	ср. зн.	3σ	выброс
1	0,01	1	0	5743,05	57,43	нет	0,1008	0,0010	нет
2	0,05	1	0	5742,98	57,43	нет	0,4998	0,0050	нет
3	0,2	1	0	5742,61	57,43	нет	1,990	0,020	нет
4	1	1	0	5742,67	57,43	нет	10,00	0,10	нет
5		1	0	5743,02	57,45	нет	199,1	1,7	нет
6	1	0,8	0	4686,43	46,87	нет	10,00	0,10	нет
7	1	1	0	5742,67	57,43	нет	10,00	0,10	нет
8	1	1,2	0	6892,22	68,93	нет	10,00	0,10	нет

Экспериментальная схема была реализована в соответствии с нормативной документацией, а именно – методикой поверки комбинированных датчиков тока и напряжения, схематическое изображение которой представлено на рис. 1, 2.

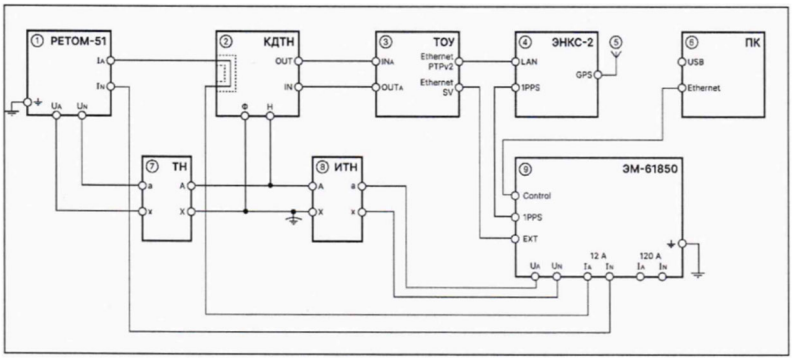


Рис. 1. Схема контроля МП РиМ КДТН до 10А

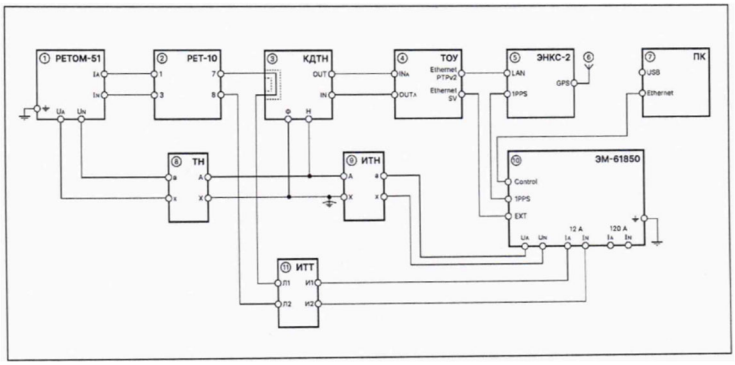


Рис. 2. Схема контроля МП РиМ КДТН свыше 10А

Полученные результаты во всех исследуемых режимах свидетельствуют о стабильном функционировании генератора РЕТОМ-51 при формировании аналоговых сигналов тока, напряжения и фазового сдвига. Наблюдаемая воспроизводимость параметров в различных условиях эксплуатации соответствует заяв-

ленным техническим характеристикам и подтверждает возможность использования устройства в качестве эталонного источника сигналов для метрологических целей [7, 8]. Исследование всех контрольных точек показало согласованные данные, что дополнительно обосновывает надежность и точность работы генератора при длительной эксплуатации.

Заключение

Применение статистического метода трех сигм (3σ) для анализа нестабильности параметров испытательного оборудования продемонстрировало высокую эффективность и информативность. Результаты исследования убедительно подтверждают, что генератор испытательных сигналов РЕТОМ-51 обладает требуемой стабильностью выходных характеристик и полностью пригоден для проведения высокоточных испытаний и поверочных работ. Метод позволил объективно оценить стабильность выходных параметров, выявить потенциальные источники дрейфа и подтвердить соответствие оборудования требованиям нормативной документации, что свидетельствует о его надежности и точности в рабочих условиях.

Разработанный подход на основе 3σ-анализа показал свою универсальность и может быть рекомендован для внедрения в практику метрологического контроля. Полученные результаты не только подтверждают пригодность РЕТОМ-51 для проведения испытаний, но и демонстрируют перспективность его использования в качестве эталонного источника сигналов. Метод обеспечивает высокую чувствительность к малым изменениям параметров, позволяет автоматизировать процесс оценки стабильности и существенно повышает достоверность получаемых результатов, что открывает новые возможности для совершенствования методик контроля измерительного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 8.000–2023 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к поверочным установкам. – Москва : Стандартинформ, 2023. – 45 с.
2. ГОСТ Р 8.735–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологические исследования. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 32 с.
3. ГОСТ Р 8.879–2020 Средства измерений электрических величин. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 28 с.
4. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые многократные измерения. Методы обработки результатов измерений. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 36 с.
5. МП ВНКЛ.411618.005 ГСИ. Датчики тока и напряжения комбинированные. Методика поверки, 2023. – 21 с.
6. ГОСТ Р 8.110–2019 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 24 с.
7. ГОСТ Р 8.615–2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение испытаний продукции. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 40 с.
8. ГОСТ Р 8.903–2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений электрических величин. Методы поверки. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 64 с.

© В. С. Крылов, И. Д. Карпов, 2025

УДК 543. 381
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-336-341

Г. В. Симонова[1]✉, А.П. Кириченко[1]

Оценка эффективности очистки зерновых культур от пестицидов

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: simgal@list.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы очистки зерновых культур от пестицидов и их эффективность. Актуальность исследования заключается в том, что остатки пестицидов, могут представлять потенциальную опасность для здоровья человека, а также оказывать негативное воздействие на окружающую среду, в том числе на почву, воду и биоразнообразие. Поэтому разработка эффективных методов очистки зерна от остатков пестицидов имеет важное экологическое значение. Таким образом, исследование имеет практическую значимость для обеспечения безопасности пищевых продуктов, сохранения окружающей среды и соответствия норм содержания вредных веществ установленным требованиям. В основной части приведен анализ современных методов разложения пестицидов, а также способов оценки их остаточной концентрации. В результате проведенных экспериментов показано, что применение излучения ультрафиолетовой части спектра для разложения пестицидов на примере глифосата приводит к существенному снижению его концентрации в исследуемых пробах.

Ключевые слова: пестициды, глифосат, разложение, хроматография, измерение

G. V. Simonova[1]✉, A. P. Kirichenko[1]

Evaluation of the efficiency of cleaning grain crops from pesticides

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: simgal@list.ru

Abstract. This article discusses methods for cleaning grain crops from pesticides and their effectiveness. The relevance of the study is that pesticide residues can pose a potential hazard to human health, as well as have a negative impact on the environment, including soil, water and biodiversity. Therefore, the development of effective methods for cleaning grain from pesticide residues is of great environmental importance. Thus, the study has practical significance for ensuring food safety, preserving the environment and ensuring compliance with the standards for the content of harmful substances. The main part provides an analysis of modern methods for decomposing pesticides, as well as methods for assessing their residual concentration. As a result of the experiments, it was shown that the use of ultraviolet radiation for decomposing pesticides, using glyphosate as an example, leads to a significant decrease in its concentration in the samples under study.

Keywords: pesticides, glyphosate, degradation, chromatography, measurement

Введение

Повышение эффективности сельского хозяйства является одной из глобальных задач человечества, поскольку именно эта отрасль создает продукты питания. Развитие продуктивности земледелия невозможно без борьбы с вредителями различного рода, что обеспечивается разработкой как новых методов агро-

техники, так и способов защиты культурных насаждений. В частности, необходимость повышения урожайности культурных растений привела к все возрастающему использованию различных химических препаратов, которые, наряду с борьбой с вредными растениями и насекомыми, сопряжены с большими экологическими рисками, связанными с использованием пестицидов.

Наиболее распространенные виды пестицидов способны не только уничтожать вредоносных насекомых и сорняки, но и могут губительно воздействовать на нецелевые виды растительного и животного мира, в том числе и на здоровье человека. В соответствии с информацией производителей, пестициды после применения должны быстро превращаться в безвредные продукты, однако, на самом деле разложение пестицидов идет очень медленно и не полностью. Попадая с пищей в живые организмы, пестициды приводят к гибели птиц, болезням людей и животных.

Остаточное количество препаратов присутствует на продукции земледелия, а также накапливается в почве с последующим переносом в водные и воздушные пространства. Более того, большая часть применяемых пестицидов не используется по назначению, а попадает в водные системы или переносится ветром на другие территории, включая пастбища, жилые зоны и прочие области. Пестициды оказывают значительное влияние на исчезновение видов, участвующих в опылении растений. Многие пестициды устойчивы к воздействию влаги и солнечного света, могут распространяться на большие расстояния.

В связи с этим возникает необходимость в разработке эффективных методов определения остаточного количества пестицидов в сельскохозяйственной продукции, а также повышения эффективности методов ее очистки. Это позволит обеспечить безопасность и качество сельскохозяйственной продукции и предотвратит возможные негативные последствия для здоровья людей и окружающей среды.

Каждая категория пестицидов связана с определенными экологическими проблемами [1]. Одним из наиболее распространенных пестицидов является глифосат, который, применяется для уничтожения сорняков и подготовки почвы перед посевом [1–5].

Методы и материалы

Методы определения остаточных количеств пестицидов представляют собой комплекс аналитических процедур, цель которых – выявить и измерить остатки пестицидов в различных средах: почве, воде, продуктах питания и других объектах окружающей среды.

Выбор метода зависит от конкретных задач исследования, типа образца пестицида и необходимой точности результатов измерений. Для получения достоверности результатов контрольных операций рекомендуется использовать несколько разных методов [5–12].

В данной работе для определения остаточной концентрации пестицидов в пробе использовались хроматографические методы анализа, основанные на повторяющихся циклах поглощения и высвобождения между подвижной фазой (растворителем), в которой находится образец, и неподвижным сорбентом. Компоненты смеси распределяются между двумя фазами. Из-за различий в структуре

и свойствах отдельных компонентов они не имеют одинакового сродства и величины взаимодействия со стационарной фазой.

Глифосат – активный компонент инсектицидов (арборицидов и гербицидов) с широким спектром действия, избирательный и стойкий. Он используется для борьбы с однолетними и многолетними сорняками в виноградниках, садах, чайных садах и на полях различных культур. Глифосат характеризуется системной гербицидной активностью, которая проявляется постоянно или избирательно, в зависимости от дозы, вида растений, фенологической стадии развития и направления действия. Данный препарат эффективен в отношении однолетних и многолетних двудольных сорняков и злаковых в течение всего вегетационного периода. Гербициды, содержащие действующее вещество глифосат, задерживают отрастание сорняков и прорастание семян на 30–60 дней. Использование глифосата в качестве комплексной стратегии защиты обеспечивает здоровый рост и урожайность, в частности, гречихи и сводит к минимуму потери от вредителей и сорняков. Тем не менее, важно следовать рекомендациям относительно дозировки и правильного времени использования пестицидов, чтобы избежать негативного воздействия на культуру и окружающую среду.

На сегодняшний день существует множество различных способов снижения содержания остаточных количеств химикатов в зерне [13]. Очистка в воде, оказала ограниченное воздействие на удаление пестицидов, поскольку большинство пестицидов являются гидрофобными по своей природе, а ферментация и другие процессы легко превращают пестициды в токсичные продукты, что показало ограниченное применение при обработке пищевых продуктов, например, было показано, что продукты распада остатков пестицидов после обработки озоном более токсичны, чем исходные соединения, поэтому можно полагать перспективным направлением разложение пестицидов с помощью фотолиза, причем заметное ускорение деградации пестицидов наблюдалось при облучении как в ультрафиолетовом, так и в видимом участке спектрального диапазона [5, 14].

Использование ультрафиолетового (УФ) излучения – один из методов очистки и обработки пищевых продуктов от остаточного количества пестицидов и различных микроорганизмов. В основе такого метода лежат фотохимические реакции в молекулах пестицидов и расщепление их на безопасные молекулы. Эффективность такого метода зависит от типа пестицида, структурной формулы, концентрации, условий облучения [15]. УФ-излучение обеспечивает быстрое, эффективное и недорогое разложение пестицидов [16], однако, и в этом случае следует учитывать, что в результате фотосинтеза могут образовывать новые, неизвестные вещества и изменяться органолептические свойства продуктов.

В данной работе исследовалась динамика разложения пестицидов на основе глифосата с использованием излучения ближнего УФ диапазона на примере зерен гречихи.

Результаты

В ходе работы проведены анализы проб зерен гречихи, содержащих глифосат (серия №1). Далее эта проба делилась на две части. Одна часть исходной

пробы сохранялась при стандартных условиях. Остаточное количество глифосата определялось по истечении двух недель (серия №2) и по истечении шести месяцев (серия №4), другая часть исходной пробы подвергалась ежедневному ультрафиолетовому облучению в течение 14 дней по 15 минут с использованием стандартного источника ультрафиолетового излучения. Результаты контроля остаточного содержания глифосата были получены после двух недель хранения (серия №3), и через полгода она также подверглась контролю (серия №5).

Для анализа динамики содержания глифосата в пробах использовался аналитический комплекс на базе хроматомасс-спектрометра SHIMADZU LCMS-8060 и разделительная ионообменная хроматографическая колонка Shim-pack HR-ODS 3UM.

Определение остаточного количества глифосата в пробах проводилось по методике ФР.1.31.2019.34964 «Методика измерений массовой доли глифосата, его метаболита аминометилфосфорной кислоты и малинового гидразида в продукции растительного происхождения методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с тандемным масс-спектрометрическим детектированием» [17].

Результаты определения остаточной концентрации глифосата при разных условиях очистки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вид очистки	Концентрация, мг/кг. (серия № 1)	Концентрация через две недели, мг/кг (серии № 2, 3 соответственно)	Концентрация через 6 месяцев, мг/кг (серии № 4, 5 соответственно)
Без облучения	0,458	0,435	0,389
С облучением УФ	0,458	0,237	0,192

Анализ полученных результатов показал, что после двухнедельного хранения пробы, содержащей остаточное количество пестицида, концентрация снизилась на 5,0 %, а при обработке пробы ультрафиолетовым излучением концентрация за этот же период снизилась на 48,3 %. После шестимесячного хранения остаточное количество пестицида снизилось на 15,1 %, а при обработке ультрафиолетом исходной пробы – на 50,6 %.

Оценка эффективности очистки ультрафиолетовым излучением на примере разложения глифосата показала, что фотолиз может быть использован для снижения остаточных количеств пестицидов в зерновых культурах.

Заключение

В результате проведенных экспериментов и анализа полученных результатов было выявлено существенное различие изменения концентрации пестицида в исследуемых пробах при разных условиях очистки, в частности, при использовании излучения УФ диапазона.

На основании анализа литературных источников можно предположить, что излучение других участков спектра также может приводить к разрушению пе-

стицидов, а эффективность очистки может быть повышена, например, изменением режимов облучения.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что применение оптических методов деструкции пестицидов, в данном случае, на примере глифосата может быть использовано для очистки зерновых культур от остаточных количеств пестицидов. Повышение эффективности применения фотолиза может быть достигнуто выбором спектрального участка излучения, а также изменением режимов облучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасенко Н. А., Петров В. И., Коваленко И. П. и др. Глифосат и его метаболиты: токсикология, экология, аналитика // Вестник экологии и ландшафтоведения. – 2018. – №. 2. – С. 47–52.

2. Петрова Е. И., Воронина О. И., Мартынова Л. Г. и др. Влияние глифосата на биологическую активность почвы // Биологические науки. – 2018. №. 6. – С. 58–65.

3. Краснодубец В. Е., Бартош В. В., Вергулов В. А. и др. Влияние глифосата на рост и развитие растений // Агрохимия. – 2019. – №. 5. – С. 61–67.

4. Majewski, M. S., Coupe, R. H., Foreman, W. T., Capel, P. D., Weston, D. P. Pesticides in Mississippi air and rain: a comparison between 1995 and 2007 // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2014., – № 33(6). – P. 1283–1293.

5. Qian X., Xiaoxu X., Grzegorz B., Joon Y., Xun S. Photolysis for the Removal and Transformation of Pesticide Residues During Food Processing: A State-of-the-Art Minireview [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2022.888047/full

6. Булгакова Л. М., Смоляр И. В., Султанова Э. М. и др. Определение остаточных количеств глифосата и его метаболитов в растениях методом жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием // Вестник Краснодарского государственного аграрного университета. – 2018. – №. 2. – С. 172–178.

7. Тимофеева С. А., Гринь Л. Н., Власова Н. В. и др. Методы определения остаточных количеств пестицидов в зерне гречихи // Вестник Пермского университета. Биология. – 2017. – №. 1 (33). – С. 84–91.

8. Масляков В. В., Линдерман Д. В., Романова Е. В. и др. Оценка эффективности ультрафиолетовой обработки для очистки воды от пестицидов // Вода: химия и экология. – 2017. – №. 9. – С. 52–58.

9. Tejada, M., Gómez, I., Parrado, J. Photocatalytic removal of imidacloprid using doped TiO2 and simulated solar light // Applied Catalysis B: Environmental. – 2019. –№ 2549. – P. 673–682.

10. Silva, V., Molina, C. B. Impacts of glyphosate and AMPA on seedlings of native grass Eragrostis plana // Journal of Environmental Science and Health, Part B. –2015. – № 50 (1). – P. 17–23.

11. Kumar, V., Sharma, A. Degradation of glyphosate herbicide by gamma radiolysis // Separation Science and Technology. –2016. – № 51 (5). P. 761–769.

12. Lozano, A., Rajski, Ł. Multiresidue analysis of pesticides in fruits and vegetables by liquid chromatography–tandem mass spectrometry // TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2015. – № 71. – P. 160–171.

13. Маркова Н. И., Лебедева Н. И., Гордеева Л. А. и др. Определение глифосата и его метаболитов в продуктах питания методом жидкостной хроматографии // Пищевая промышленность. – 2019. – №. 4. – С. 64–70.

14. Tu M., Hurd C., Robinson R., Randall J. M. Glyphosate Weed Control Methods Handbook. – The Nature Conservancy, 2001. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://www.invasive.org/gist/products/handbook/methods-handbook.

15. Никонова Г. А., Иванова О. В., Смирнова Е. П. и др. Деградация пестицидов в почвах и методы их определения // Почвоведение. – 2018. – №. 5. – С. 82–89.

16. Орехова Е. В., Медведева Н. А., Стариков А. В. и др. Экологические последствия применения пестицидов в сельском хозяйстве // Экологическая безопасность и природопользование. – 2017. – №. 2. – С. 94–101.

17. Сорокин А. В. Методика измерений массовой доли глифосата, его метаболита аминометилфосфорной кислоты и малинового гидразида в продукции растительного происхождения методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с тандемным масс-спектрометрическим детектированием // Журнал аналитической химии. – 2023, – Т. 78. – № 1. – С. 80–89.

© Г. В. Симонова, А. П. Кириченко, 2025

УДК 681.783.25
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-342-350

В. М. Тиссен[1]✉, В. Д. Рачков[2]

Построение моделей изменений бортовых шкал времени ГЛОНАСС и GPS по данным частотно-временных поправок

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: tissen.ksn@yandex.ru

Аннотация. Приведены модели бортовых шкал времени (БШВ) квантовых часов, установленных на космических аппаратах (КА) ГЛОНАСС и GPS. Проанализированы особенности поведения БШВ для разных КА, по которым выделены общие закономерности и различия в их изменениях. Представлены графики расхождений БШВ относительно центрального синхронизатора КА ГЛОНАСС и GPS, наглядно показывающие трендовые, квадратичные и случайные составляющие их изменений на временных интервалах до 150 суток. Представлена математическая модель, аппроксимирующая полный спектр нестабильностей хода бортовых часов. Приведены параметры наиболее устойчивых периодических колебаний в БШВ ГЛОНАСС и GPS. Параметры гармонических компонент оценены с помощью метода наименьших квадратов (МНК) по методике, ранее разработанной авторами для целей вычисления прогнозов параметров вращения Земли. Для проверки исходных данных на регулярность использовался программный имитатор случайных чисел с характеристиками нестабильностей, близкими к характеристикам бортовых часов.

Ключевые слова: квантовые часы, моделирование, прогнозирование, космический аппарат, эффект Доплера, бортовые шкалы

V. M. Tissen[1]✉, V. D. Rachkov[2]

Developing models of changes in the on-board GLONASS and GPS time scales based on the data of time-frequency corrections

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2] West Siberian Branch of FSUE VNIIFTRI, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: tissen.ksn@yandex.ru

Abstract. Models of on-board time scales (OTS) of quantum clocks installed on GLONASS and GPS spacecraft are presented. The features of the OTS behavior for different spacecraft are analyzed, according to which common patterns and differences in their changes are identified. Graphs of the OTS discrepancies relative to the central synchronizer of the GLONASS and GPS spacecraft are presented, clearly showing trend, quadratic and random compounding of their changes over time intervals up to 150 days. A mathematical model is presented that approximates the full range of instability of the onboard clock. The parameters of the most stable periodic oscillations in the OTS GLONASS and GPS are given. The parameters of the harmonic components were estimated using the least squares method (LSM) according to the method previously developed by the authors for the purpose of calculating forecasts of the Earth's rotation parameters. To verify the initial data for regularity, a software simulator of random numbers with instability characteristics close to those of the onboard clock was used.

Keywords: quantum clock, simulation, forecasting, spacecraft, Doppler effect, on-board scales

Введение

В настоящее время для прогнозирования поведения БШВ относительно шкалы центрального синхронизатора (ЦС) используются модели, в которых учитываются линейная и, реже, квадратичная составляющие расхождения этих шкал. Линейная составляющая обусловлена смещением частоты бортовых часов относительно частоты часов центрального синхронизатора. Квадратичная часть вызывается дрейфами частот бортовых часов, для аппроксимации которых используют полиномы второй степени [1]. Считается, что остальные быстро и медленно текущие изменения в бортовых шкалах носят случайный или псевдослучайный характер, обусловленный характеристиками нестабильности спутниковых часов. Однако, такая постановка упрощает действительную картину поведения БШ, так как она не учитывает того, что действующие на КА разнообразные возмущения периодического и квазипериодического характера не могут быть точно учтены никакими моделями. Так, на орбиту КА влияют геопотенциалы от второй зональной гармоники гравитационного поля Земли и другие более высокочастотные гармоники. Следует учитывать влияние приливных деформаций, возникающих от притяжения Луны и Солнца. Большое влияние на параметры орбиты КА оказывает солнечная радиация, вызывающая давление на солнечные батареи и другие конструкции КА. Неточности при учете всех этих влияющих на движение КА факторов накладывают на ход бортовых часов дополнительные вариации, имеющие регулярный характер. Для компенсации ухода БШВ относительно шкалы ЦС в пунктах наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС формируются предвычисленные значения частотно-временных поправок (ЧВП), которые затем передаются на бортовые компьютеры КА ГЛОНАСС. По переданным таким образом на бортовые компьютеры данным с помощью специальных алгоритмов формируется системная шкала времени ГЛОНАСС, которая затем в составе навигационного сообщения передается в наземные пункты контроля и другим потребителям навигационной информации [2].

Методы и материалы

Точный аналитический учет всех влияющих на орбиту КА сил невозможен по причинам упрощения моделей действующих на КА факторов в сравнении с их реальными воздействиями. Частичное решение этой проблемы может быть получено статистическими методами. Поэтому в настоящей статье рассматриваются многокомпонентные модели хода БШВ, аппроксимирующие линейные, квадратичные тренды и квазигармонические колебания. Для повышения точности предаваемых в бортовые компьютеры ЧВП в настоящей статье выполнен анализ характера поведения БШВ для ряда выборочных КА ГЛОНАСС и GPS. Для наглядности по данным ЧВП, регулярно размещаемых на сайте [3], построены графики их изменений на периодах от 30 до 150 дней.

Для аппроксимации квазипериодических колебаний используются полигармонические модели, насчитывающие до 30 гармоник. Параметры всех составля-

ющих модели хода БШВ оцениваются с помощью специально разработанной на базе МНК методике [4] для каждого КА отдельно. При этом используются интервалы данных ЧВП от одного до пяти месяцев. Случайная компонента оценивается по уровню нестабильностей бортовых часов, приведенных в технической документации на данный тип часов. Исходя из поинтервальных характеристик нестабильностей выбранных бортовых часов строятся модельные временные ряды с помощью специально разработанного для этих целей программного имитатора случайных чисел по методу Монте-Карло [5].

Уравнение модели, включающее трендовые, квазипериодические члены и нестабильности любых квантовых часов записывается в виде:

$$S(t) = 0,5 w_0 t^2 + q_0 t + S_0 + \sum_{j=1}^{N} a_j \sin(2\pi t / T_j + \phi_j) + \sigma Si, \qquad (1)$$

где σSi – случайная компонента ухода часов; S_0, q_0, w_0 – коэффициенты уравнения, учитывающие линейный и квадратичные тренды в изменениях БШВ; $j = 1,2,...,N$ – порядковый номер гармонической составляющей.

Значения коэффициентов, входящих в первые три члена уравнения (1), оцениваются по МНК без учета гармонических и случайных компонент на различных интервалах данных. Соответствующая методика оценивания S_0, q_0, w_0 приведена в работе [4]. Решение имеет вид:

$$w_0 = \frac{\sum_{k=1}^{n} w(t_k)}{n}$$

$$q_0 = \frac{\sum_{k=1}^{n} q(t_k) - w_0 \sum_{k=1}^{n} t_k}{n} \qquad (2)$$

$$S_0 = \frac{\sum_{k=1}^{n} S(t_k) - 0,5 w_0 \sum_{k=1}^{n} t_k^2 - q_0 \sum_{k=1}^{n} t_k}{n}.$$

Численные значения коэффициентов S_0, q_0, w_0 оцениваются по формулам (2) индивидуально для каждого КА.

Для оценивания параметров периодических вариаций частоты и мощности в изменениях БШВ использована методика, приведенная в работе [6].

Случайная компонента σSi моделирует центрированный гауссовский процесс с заданными поинтервальными дисперсиями. Моделирование выполнено с применением метода Монте-Карло по алгоритму, подробно описанному в [7].

Выводы и результаты

Для проведения сравнительного анализа синтезированных с помощью ГСЧ случайных чисел r_1, r_2,...r_6 были построены модели нестабильностей квантовых часов с различными по величине дисперсиями Аллана на интервалах времени: 1, 10,…, 10^5 сек.

На рис. 1 приведены примеры такой реализации для 30-суточного временного ряда при заданных вариациях Аллана: $3\cdot10^{-12}$; $1\cdot10^{-12}$; $3\cdot10^{-13}$; $1\cdot10^{-13}$; $3\cdot10^{-14}$; $1\cdot10^{-14}$.

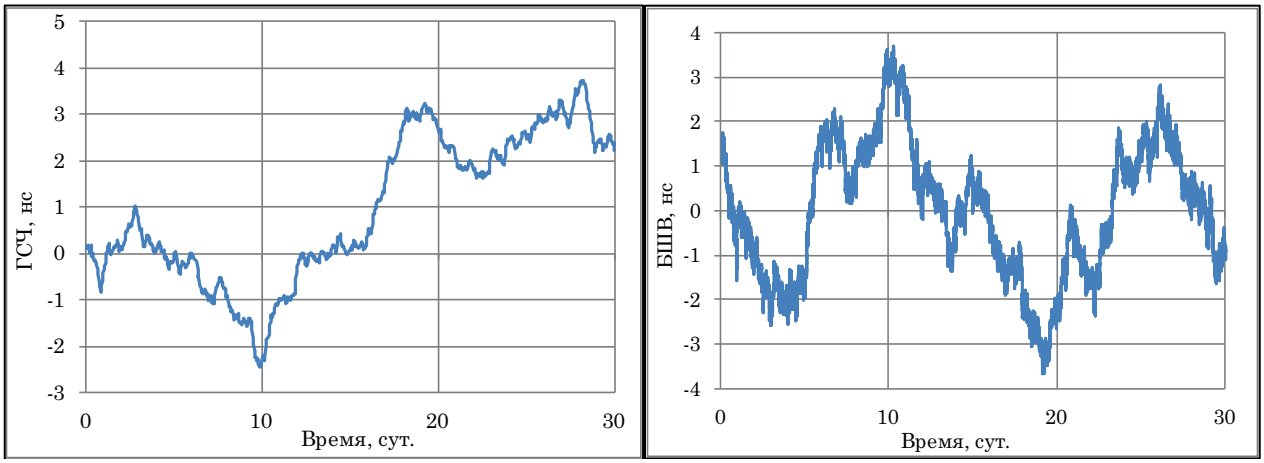


Рис.1. Программная реализация нестабильности ухода часов

На рис. 2 приведены графики полного ухода БШВ КА GPS (G02) относительно шкалы ЦС (слева) и после снятия линейного тренда (справа). На рис. 3 приведены графики, аналогичные рис. 2, для КА ГЛОНАСС (R02). Данные для построения графика взяты с сайта международной системы геодезических данных CDDIS. При этом было выполнено ранжирование данных по номерам КА с последующим формированием их в суточные и 150-суточные файлы.

При сравнении графиков на рис. 2 и 3 видно, что после снятия линейных трендов изменения БШВ G02 носят существенно более выраженный параболический характер в сравнении с изменениями БШВ R02, что связанно с использованием различных стандартов частоты в GPS и ГЛОНАСС.

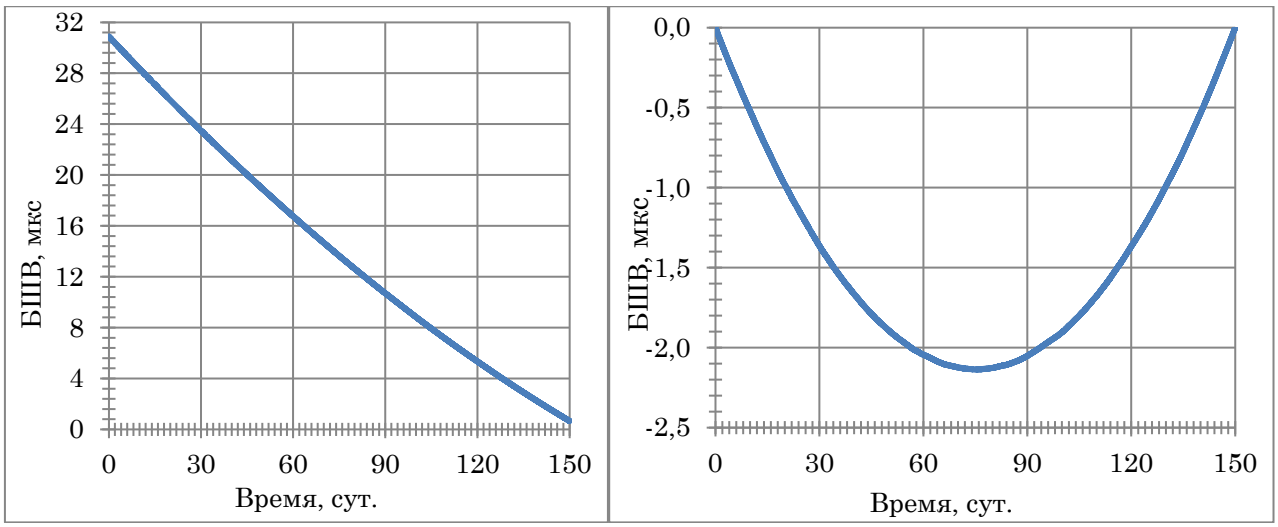


Рис. 2. Линейный и квадратичные тренды БШВ КА GPS (G02) на 150 сутках

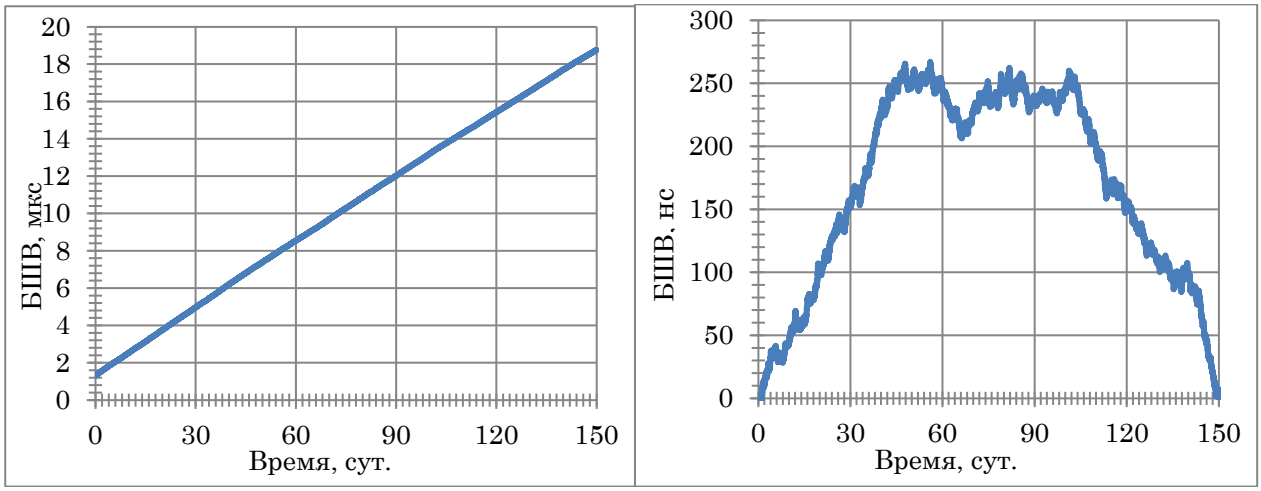


Рис. 3. Линейный и квадратичные тренды
БШВ КА ГЛОНАСС (R02) на 150 сутках

На рис. 4 приведены остаточные расхождения БШВ НС ГЛОНАСС (R02) и НС GPS (G02) относительно шкалы ЦС на 150-тисуточном интервале после снятия с них линейного и квадратичных трендов.

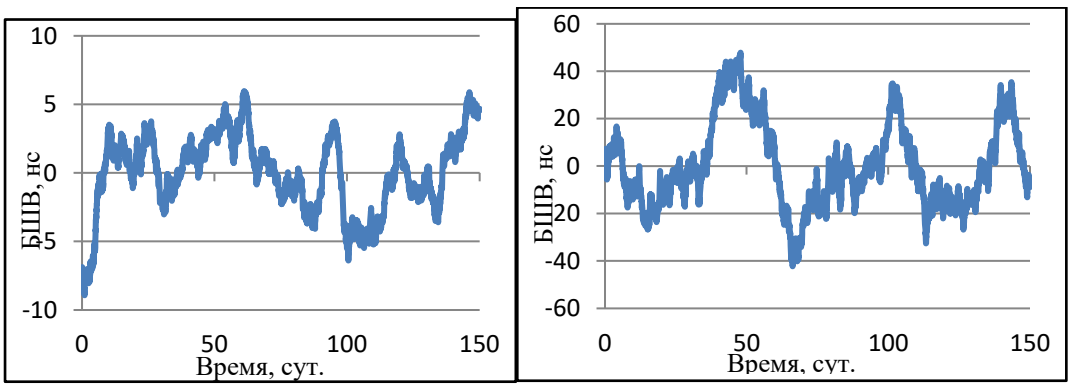


Рис. 4. Остаточные вариации БШВ R02 (слева) и G02 (справа) на 150 сутках

На рис. 5, 6 приведены остаточные поправки к БШВ для четырех НС ГЛОНАСС и GPS соответственно.

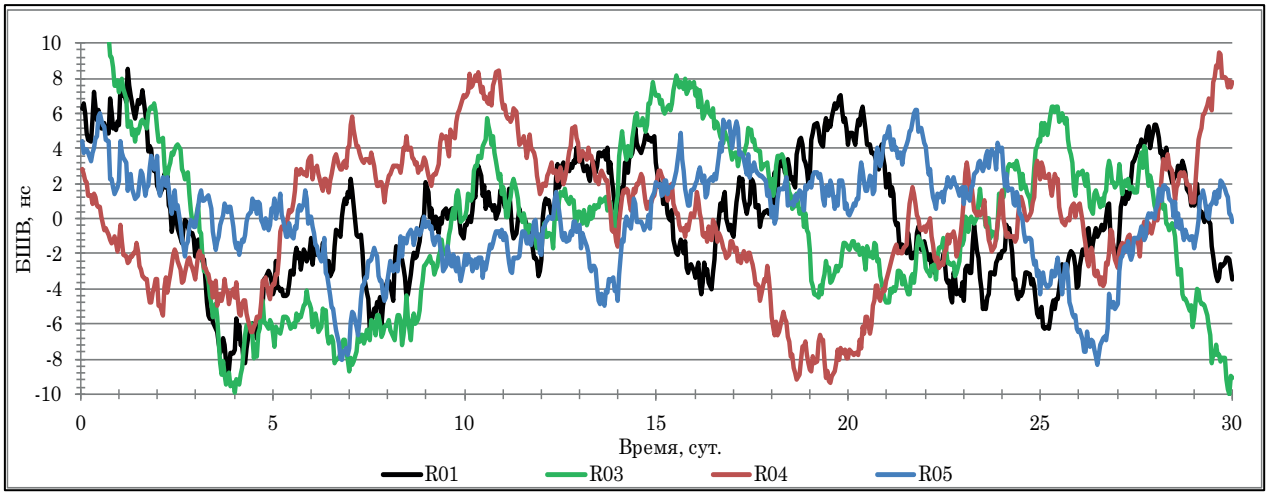


Рис. 5. Остаточные поправки к БШВ для четырех НС ГЛОНАСС на 30-суточном интервале

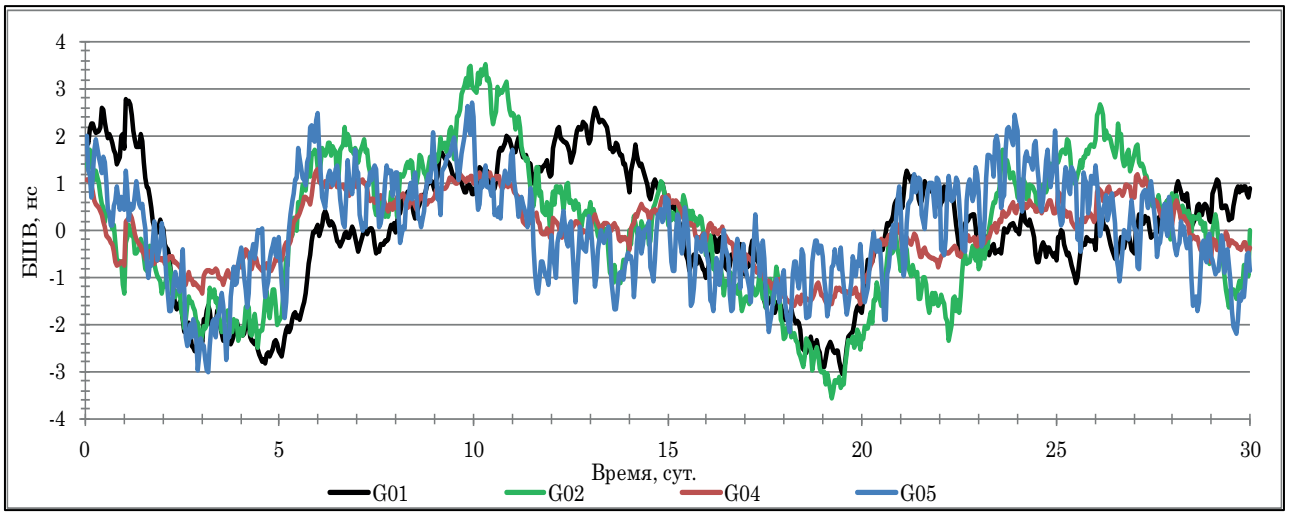


Рис. 6. Остаточные поправки к БШВ для четырех НС GPS на 30-суточном интервале после снятия линейного и квадратичного трендов

Сравнивая характер графиков на рис. 5, 6, следует отметить, что в поведении БШВ GPS заметна значимая корреляция по всем четырем КА. В частности, на общем фоне заметно выделяется колебания с периодом около 14 суток, что близко периодам основных Лунно-Солнечных основных приливных гармоник.

Заметное отличие поведения БШВ квантовых часов, установленных на КА ГЛОНАСС и, особенно, на КА GPS, от синтезированных программным имитатором (см. рис. 1) связано с тем, что все КА этих систем вместе с часами находятся в постоянном вращении вокруг Земли с периодами близкими к 12 часам. Вследствие этого неизбежно влияние на орбиту КА различных периодических сил кон-

сервативного и неконсервативного характера. Многие из этих сил вследствие воздействия на КА различных эффектов физико-технического характера не могут быть учтены в полной мере и поэтому находят свое отражение в вариациях БШВ.

На рис. 7, 8 приведены графики остаточных вариаций ЧВП для бортовых шкал КА G02 и G08 за период около 100 суток, выделенные зеленным и синим цветом. Синим цветом показаны те данные, которые не были использованы для оценок параметров модели. Коричневым цветом показаны модельные значения ЧВП. Таким образом, сравнивая разности между модельными и действительными значениями ЧВП на зеленном и синем участках можно получить визуальную оценку точности прогноза ЧВП на 20-суточном интервале синего участка.

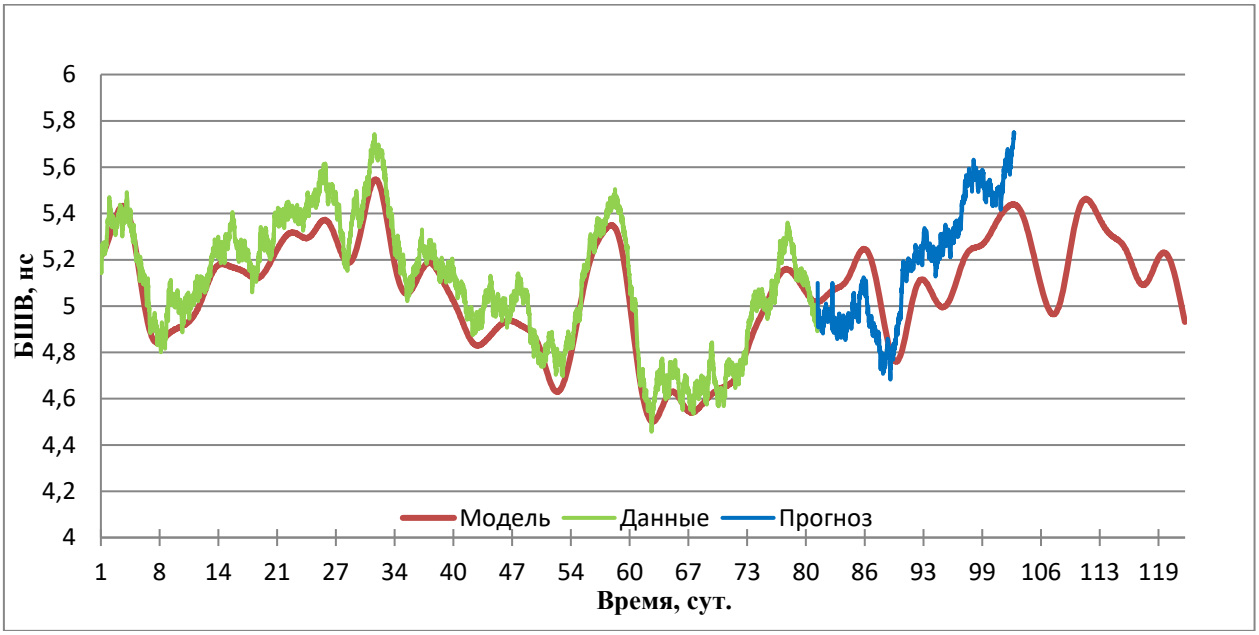


Рис. 7. Остаточные вариации и модельные значения БШВ G02 на 120 сутках

Из анализа графиков на рис. 7, 8 следует отметить, что модельные данные в сравнении с действительным остаточными вариациями ЧВП имеют более гладкий вид. Это в большей степени относится к бортовой шкале КА G02, коротко-периодические вариации которой заметно выше вариаций бортовой шкалы КА G08. При этом визуально заметно, что прогноз (модель) БШВ КА G08 точнее ложится на действительные данные ЧВП в сравнении с прогнозом БШВ КА G08. Отсюда можно сделать вывод о зависимости качества прогнозов БШВ от характера их остаточных вариаций, во многом определяемых характеристиками нестабильности квантовых часов, установленных на КА ГЛОНАСС и GPS.

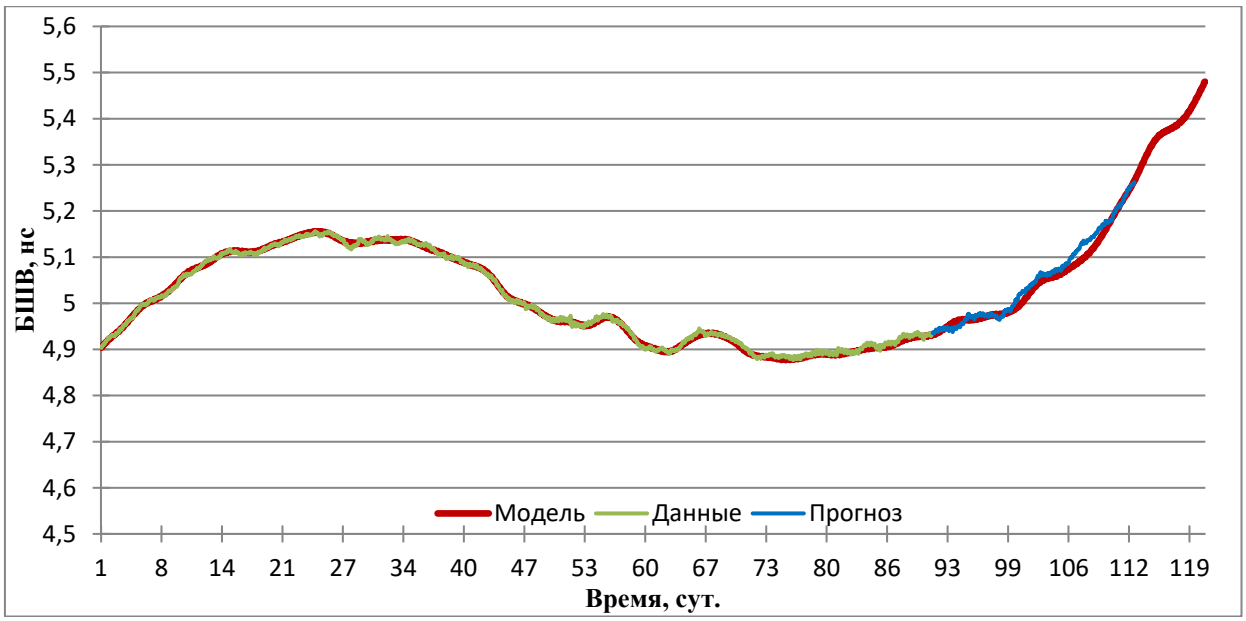


Рис. 8. Остаточные вариации и модельные значения БШВ G08 на 120 сутках

Заключение

Проведенные исследования позволили выявить основные закономерности в изменениях БШВ квантовых часов КА ГЛОНАСС и GPS на длительных временных интервалах. Приведенная модель изменений БШВ в виде уравнения, содержащего линейную, квадратичную и полигармоническую составляющие, представляет интерес для целей прогнозирования хода бортовых шкал на длительные недельные сроки. Это приобретает особое значение для достижения требуемой точности эфемеридно-временного и навигационного обеспечения системы ГЛОНАСС в вынужденные периоды ее автономного функционирования [8].

Таким образом, предлагаемая в настоящей статье трехкомпонентная модель может быть использована как для частотно-временного анализа поведения БШВ, так и для повышения точности долгосрочного прогнозирования ухода БШВ ГНСС по данным ЧВП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tryon, P. Estimation of Parameters in Models cesium Beam atomic Clocks // J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1983. – № 1. – P. 3–16.

2. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – 3-е изд., перераб. – Москва: Радиотехника, 2005. – 688 с.

3. CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) – Архив данных космической геодезии NASA: официальный сайт. – URL: https://cddis.nasa.gov (дата обращения 01.05.2025).

4. Тиссен В. М., Толстиков А. С., Симонова Г. В. Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью адаптивных гармонических моделей // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 238–245.

5. Соболь И. М. Метод Монте-Карло. – Москва : Наука, 1985. – 78 с.

6. Тиссен В. М, Балахненко А. Ю., Рачков В. Д. Прогнозирование ухода шкал времени бортовых часов с помощью трехкомпонентной модели // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2024. – № 69. – С. 47–55.

7. Тиссен В. М., Балахненко А. Ю. Применение метода Монте-Карло для анализа кратковременной и долговременной составляющих нестабильностей квантовых часов // Актуальные проблемы электронного приборостроения. – 2016. – Труды XIII международной научно-практической конференции: в 12 томах. – Том. 3. – Сер. Часть 1 Метрология и метрологическое обеспечение. – С. 70–73.

8. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2021–2030 годы» в рамках государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России».

© В. М. Тиссен, В. Д. Рачков, 2025

УДК 004.91
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-351-356

Е. В. Рыжкова[1]✉, А. В. Шабурова[1]

Введение электронной фиксации данных при проведении контроля качества наукоемкой продукции

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: alena.tarasova.2014@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема недостаточной эффективности традиционной системы пооперационного контроля качества наукоемкой продукции, основанной на использовании бумажных карт. Обосновывается необходимость перехода к цифровой фиксации данных, как к инструменту повышения достоверности, прозрачности и управляемости производственного процесса. Представлены блок-схемы традиционного и цифрового подходов, проанализированы ключевые преимущества внедрения электронных систем в рамках концепции Индустрии 4.0. Отмечена роль цифровизации в автоматизации формирования паспортов изделий, снижении рисков и повышении удовлетворенности потребителя. Сделан вывод о стратегической значимости электронного контроля качества для инновационно ориентированных производств.

Ключевые слова: контроль качества, цифровая фиксация данных, наукоемкая продукция, Индустрия 4.0, цифровизация производства

E. V. Ryzhkova[1]✉, A. V. Shaburova[1]

Introduction of electronic data recording during quality control of high-tech products

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: alena.tarasova.2014@mail.ru

Abstract. Annotation. The article considers the problem of insufficient effectiveness of the traditional system of postoperative quality control of high-tech products based on the use of paper cards. The necessity of switching to digital data recording as a tool for increasing the reliability, transparency and manageability of the production process is substantiated. Flowcharts of traditional and digital approaches are presented, the key advantages of implementing electronic systems within the framework of the Industry 4.0 concept are analyzed. The role of digitalization in automating the formation of product passports, reducing risks and increasing customer satisfaction is noted. The conclusion is made about the strategic importance of electronic quality control for innovation-oriented industries.

Keywords: quality control, digital data capture, high-tech products, Industry 4.0, digitalization of production

Введение

В условиях современного производства наукоемкой продукции, особенно в оборонной, аэрокосмической и высокоточной отраслях, возрастает необходимость обеспечения высокого уровня качества на всех этапах жизненного цикла изделия [1]. Ключевую роль в этом процессе играет пооперационный контроль

качества, осуществляемый в ходе изготовления [2]. На большинстве производств сбор данных о прохождении контроля качества фиксируется на бумажных носителях – картах контроля, сопровождающих изделие от этапа поставки сырья до отгрузки готового изделия на склад [3–4]. Однако, данная система обладает рядом существенных недостатков, снижающих ее эффективность и надежность [5–6].

С практической точки зрения карта контроля на бумажном носителе подвержена физическому износу: она может быть утеряна, испорчена, загрязнена или восстановлена не всегда по достоверным данным, что влечет за собой искажение фактических данных [7–8]. Отсутствие централизованной верификации и оперативного доступа к актуальной информации затрудняет принятие управленческих решений [9].

С научной точки зрения такая практика вступает в противоречие с принципами стандарта ISO 9001:2015, который требует обеспечения прозрачности процессов, достоверности данных, управления рисками и ориентации на удовлетворенность потребителя [10]. В условиях развития концепции Индустрии 4.0 применение карт контроля на бумажных носителях можно рассматривать как устаревшую технологию, не соответствующую требованиям цифровизации производственных систем [11].

Методы и материалы

На рис. 1 представлена блок-схема осуществления пооперационного контроля качества изделия, начиная с поставки сырья на производство и заканчивая формированием паспорта изделия на основании сопроводительной и отчетной документации по качеству.

Схема иллюстрирует последовательное прохождение стадий технологического процесса: поставка, заготовительные, механические, сборочные операции, изготовление изделия, отгрузка. На каждом этапе осуществляется контроль качества, результаты которого фиксируются в карте контроля. Карта контроля представляет собой индивидуальный документ, содержащий информацию о выполненных технологических операциях и результатах контроля на каждом этапе [12]. При переходе изделия между цехами или участками карта передается вместе с изделием, или заменяется новой, соответствующей этапу изготовления. При этом предыдущая карта передается в отдел технического контроля, где хранится для последующего формирования итогового паспорта изделия. По завершении всех этапов карты подшиваются, а на их основе формируется окончательный документ – паспорт изделия с пооперационными характеристиками, зафиксированными в пределах допусков, установленных конструкционной документацией.

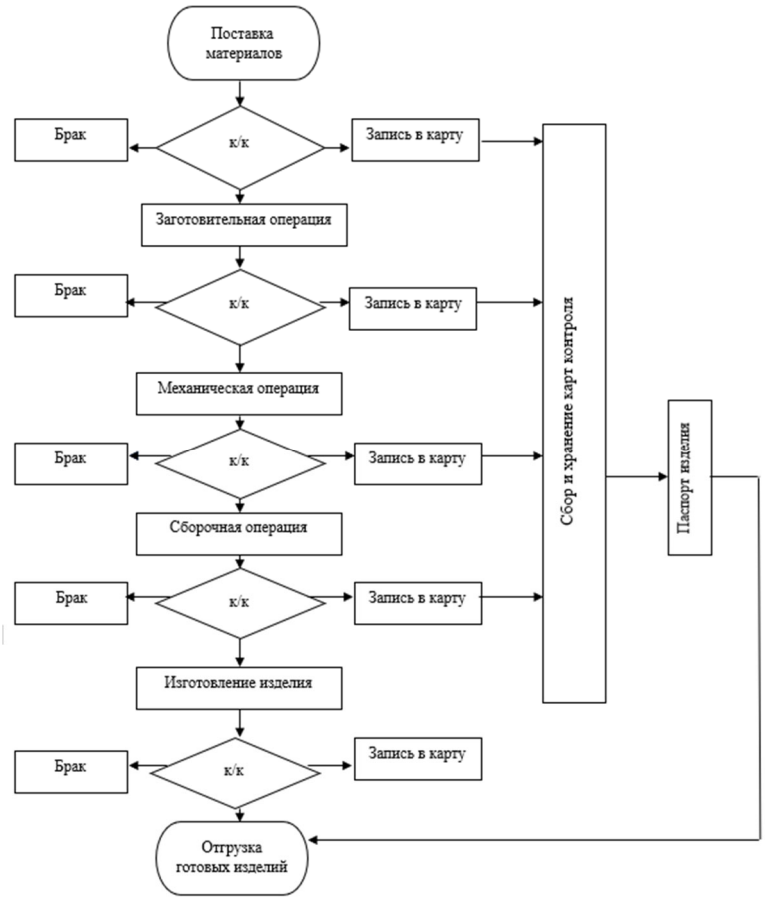


Рис. 1. Блок-схема проведения контроля качества
с использованием бумажной карты изделия

Однако, данная система подвержена ряду практических рисков [13–15]:

– карты могут быть утеряны при транспортировке изделия между цехами;

– физический износ (разрывы, загрязнения, деформации) может привести к утрате данных;

– человеческий фактор при восстановлении информации нередко становится источником искажений;

– отсутствие централизованного доступа к актуальной информации затрудняет контроль, аналитику и принятие решений в реальном времени.

Все вышеперечисленное подчеркивает необходимость в модернизации существующей фиксации данных контроля качества.

При переходе к электронному формату происходит модификация схемы, отраженной на рис. 1. Обновленная блок-схема, в которой каждый этап контроля сопровождается внесением информации в единую информационную систему контроля качества, показана на рис. 2. В отдел технического контроля данные поступают в единую информационную систему автоматически, исключая бумажный документооборот [16].

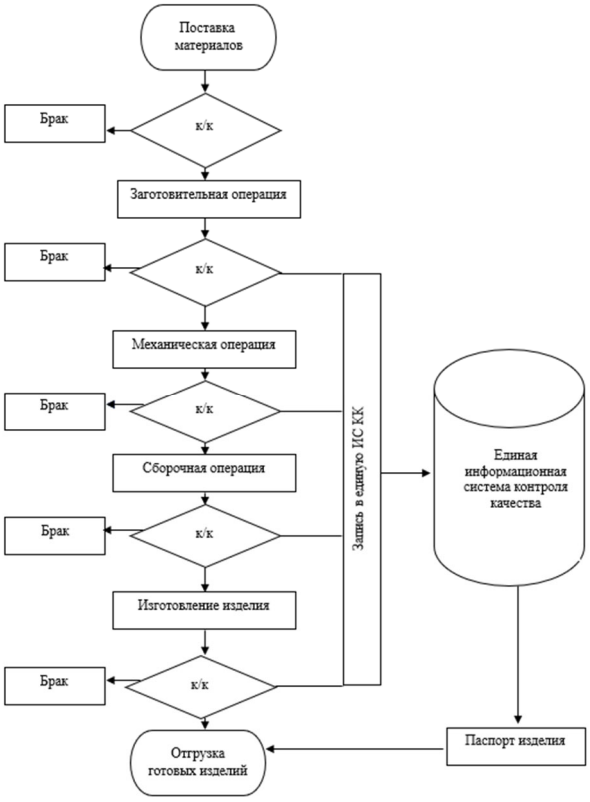


Рис. 2. Блок-схема проведения контроля качества
с цифровой фиксацией данных

Новый блок в схеме «Проведение контроля качества с цифровой фиксацией данных» отображает модернизированный процесс контроля качества на предприятии, ориентированном на производство наукоемкой продукции, где после каждой операции контроля качества данные заносятся в единую информационную систему контроля качества и находятся в открытом доступе на всем промежутке изготовления изделия, что в итоге позволит автоматически сформировать паспорт изделия.

Ключевое отличие от схемы, представленной на рис. 1, заключается в полной цифровизации документооборота. Вместо использования бумажных носителей, таких как карта, прикрепляемая к изделию, все данные вводятся напрямую в цифровой интерфейс [17]. В обновленной схеме реализованы следующие новые функциональные блоки [18–20]:

– единая цифровая система контроля качества, интегрированная со всеми производственными и контрольными участками;

– автоматизированное формирование цифрового паспорта изделия;

– обеспечение онлайн-доступа к результатам контроля на всех этапах жизненного цикла изделия для всех заинтересованных подразделений, включая отдел технического контроля, технологическую и логистическую службы.

Таким образом, внедрение данной цифровой модели способствует повышению прозрачности и прослеживаемости процессов, оперативности принятия ре-

шений, а также снижению риска потери или искажения информации за счет отказа от бумажных носителей.

Заключение

Таким образом, внедрение цифровой системы фиксации данных при осуществлении контроля качества не только устраняет недостатки, присущие традиционному документообороту на бумажных носителях, но и существенно упрощает и ускоряет переход к цифровой модели управления качеством. Это позволяет повысить достоверность и оперативность обработки информации, снизить объем ручных операций и минимизировать риски потерь данных. В результате создаются условия для обеспечения прозрачности и прослеживаемости производственных процессов в реальном времени, что особенно актуально для предприятий, ориентированных на выпуск наукоемкой продукции. Цифровизация процессов контроля качества должна рассматриваться как неотъемлемый элемент стратегического развития предприятия в контексте требований Индустрии 4.0 и формирования устойчивой, инновационно ориентированной производственной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Редько Л. А., Сацута А. Е., Янушевская М. Н. Обеспечение качества продукции: идентификация действий персонала на этапах жизненного цикла // Компетентность. – 2021. – № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-kachestva-produktsii-identifikatsiya-deystviy-personala-na-etapah-zhiznennogo-tsikla (дата обращения: 20.04.2025).

2. Настека В. В., Колотовский П. А., Кисляков М. Ю., Плесняев В. А., Жучков К. Н., Николаева Н. А., Щетинин Г. В. Система пооперационного контроля за ходом капитального ремонта как инновационный инструмент повышения качества работ на объектах ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2018. – № 3 (773). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-pooperatsionnogo-kontrolya-za-hodom-kapitalnogo-remonta-kak-innovatsionnyy-instrument-povysheniya-kachestva-rabot-na (дата обращения: 20.04.2025).

3. Васильев В. А., Одиноков С. А. Сбор и анализ данных в управлении качеством технологического процесса // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – № 7. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sbor-i-analiz-dannyh-v-upravlenii-kachestvom-tehnologicheskogo-protsessa (дата обращения: 20.04.2025).

4. Исаев С. В. 25 правил внедрения и применения SPC // Методы менеджмента качества. – 2015. – № 4. – С. 40–45.

5. Васильев В. А., Одиноков С. А., Борисова Е. В., Летучев Г. М. Методы управления качеством инновационных технологических процессов // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № 8–10. – С. 56–60.

6. Борисова Е. В., Гришаева С. А. Инструменты управления, позволяющие повысить конкурентоспособность организации // Качество. Инновации. Образование. – 2018. – № 6 (157). – С. 169–173.

7. Гришаева С. А. Менеджмент качества на предприятии // Вестник МАТИ. – 2009. – № 16 (88). – С. 286–290.

8. Агарков А. П. Управление качеством : учебное пособие. – Москва: Дашков и К, 2015. – 208 с.

9. Гаврилова С. В. Концептуальные основы определения высокотехнологичного сектора экономики и функционирования высокотехнологичных компаний // Экономика, Статистика и Информатика. – 2014. – № 57 (2), – С. 53–57.

10. Антонов Г. А. Основы стандартизации и управления качеством продукции. – Санкт-Петербург : СПбУЭФ, 2005. – 144 с.

11. ГОСТ 15467–79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения : межгос. стандарт. – Введ. 01.07.1979. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 21 с.

12. Версан В. Г. Интеграция управления качеством продукции. Новые возможности. - Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 218 с.

13. Полховская Т. М., Карпов Ю. А., Соловьев В. П. Основы управления качеством продукции. – Москва : МИСИС, 1992. – 240 с.

14. Шамилева Э. Э., Фазылова Н. Н. Управление качеством продукции на предприятии // Символ науки. – 2015. – № 11. – С. 198–202.

15. Redko L. A., Yanushevskaya M. N., Plotnikova I. V. Social Responsibility of Business // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences. – 2016. – Vol. 7. – DOI: 10.15405-2016-7-173-180.

16. Шумилова И. В., Луговкина О. А. Организация контроля качества аудиторской деятельности // АНИ: экономика и управление. – 2013. – № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-kontrolya-kachestva-auditorskoy-deyatelnosti (дата обращения: 21.04.2025).

17. Глущенко А. В., Худякова А. С. Система обеспечения качества аудита // Международный бухгалтерский учет. – 2011. – № 6 (156). – С.20–28.

18. Мугаева Е. В. Цифровизация как современный вектор развития менеджмента. Естественно-гуманитарные исследования. – 2021. – № 36 (4). – С. 194–197.

19. Вдовенко, Л. А. Информационная система предприятия : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Вузовский учебник, 2021. – 302 с.

20. Сапунов А. В., Сапунова Т. А. Актуальность внедрения искусственного интеллекта в управлении производством на предприятии. Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. № 5–3 (87). – С.47–50.

© Е. В. Рыжкова, А. В. Шабурова, 2025

УДК 006
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-357-363

М. С. Приморский[1]✉, А. В. Шабурова[1]

Совершенствование системы управления проектами на основе стандартов ISO

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: primorskiy907@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс совершенствования системы управления проектами на основе стандартов ISO. Рассматривается интеграция принципов менеджмента качества в проектную деятельность как стратегический инструмент повышения эффективности организации. Проанализированы ключевые аспекты стандартов ISO 9001 и ISO 21500, которые составляют методологическую основу оптимизации процессов управления проектами. Особое внимание уделено подходу, основанному на оценке рисков, и использованию современных информационных технологий в контексте управления проектами. На этой основе разработаны практические рекомендации по внедрению интегрированной системы менеджмента, объединяющей принципы управления проектами и менеджмента качества. Представленные в статье методы и инструменты направлены на минимизацию рисков, повышение эффективности проектной деятельности и достижение устойчивых конкурентных преимуществ в современных рыночных условиях.

Ключевые слова: управление проектами, управление качеством, стандарты ISO, оптимизация процессов, риск-ориентированный подход

M. S. Primorskiy[1]✉, A.V. Shaburova[1]

Improving the project management system based on ISO standards

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: primorskiy907@gmail.com

Abstract. This article discusses the process of improving the project management system based on ISO standards. The article considers the integration of the principles of quality management into project activities as a strategic tool for improving the effectiveness of the organization. The key aspects of ISO 9001 and ISO 21500 standards, which form the methodological basis for optimizing project management processes, are analyzed. Special attention is paid to the risk-based approach and the use of modern information technologies in the context of project management. Based on this, practical recommendations have been developed for the implementation of an integrated management system that combines the principles of project management and quality management. The methods and tools presented in the article are aimed at minimizing risks, increasing the efficiency of project activities and achieving sustainable competitive advantages in modern market conditions.

Keywords: project management, quality management, ISO standards, process optimization, risk-based approach

Введение

В условиях возрастающей сложности и масштабности проектов, реализуемых современными организациями, поиск эффективных инструментов управле-

ния проектами становится стратегической задачей. Успешное завершение проектов и достижение целей напрямую связаны с внедрением эффективных методологий управления и строгим соблюдением установленных стандартов качества.

Стандарты ISO предлагают структурированный подход к управлению проектами, обеспечивая методологическую основу для планирования, выполнения и мониторинга проектной работы. В частности, стандарты ISO 9001 [1] и ИСО 21500 [2] содержат исчерпывающие рекомендации по формированию и поддержанию системы менеджмента качества, которая обеспечивает последовательную реализацию проекта и удовлетворение требований заинтересованных сторон. Согласно исследованиям, организации, которые внедряют стандарты ISO в свою практику управления проектами, демонстрируют значительный рост успешности проектов. По данным Института управления проектами (Project Management Institute), у таких организаций на 25% больше шансов уложиться в бюджет и сроки, а также на 30% выше вероятность достичь успеха проекта. Это указывает на значительный потенциал стандартов ISO как инструмента совершенствования управления проектами.

Современная тенденция к цифровизации и автоматизации процессов управления создает дополнительные возможности для интеграции стандартов ISO в системы управления проектами. Использование информационных технологий позволяет более эффективно планировать, отслеживать и контролировать проекты, а также способствует принятию обоснованных решений на основе анализа данных. В этом контексте следует отметить, что стандарты ISO не являются статичными инструментами, а представляют собой динамично развивающуюся систему, которая адаптируется к изменяющимся требованиям бизнес-среды. Постоянное совершенствование и обновление стандартов обеспечивает их актуальность и применимость к современным проектам различной сложности и масштаба. Данная статья направлена на анализ методов совершенствования системы управления проектами на основе стандартов ISO, а также разработку практических рекомендаций по их внедрению в практику проектирования организаций.

Методы и материалы

Методологической основой данного исследования является системный анализ стандартов ISO с целью выявления их потенциала для совершенствования управления проектами. В качестве основных методов исследования используются:

– анализ нормативных документов, включая стандарты ISO 9001:2015; «Системы менеджмента качества. Требования» и ISO 21500:2012 «Руководство по проектному менеджменту»;

– сравнительный анализ практик управления проектами в организациях, внедривших и не внедривших стандарты ISO;

– метод синтеза для формирования интегрированного подхода к управлению проектами на основе стандартов качества;

– моделирование процессов управления проектами с учетом требований ISO.

Информационную базу исследования составили официальные документы Международной организации по стандартизации (ISO), материалы Project Management Institute (PMI), статистические данные о реализации проектов, а также научные публикации в области управления проектами и менеджмента качества [3–7]. В рамках обзора проведен анализ взаимосвязи между уровнем зрелости системы управления проектами и степенью интеграции стандартов ISO в практику организаций. Это позволило выявить критические факторы успеха при внедрении интегрированных систем управления и сформулировать практические рекомендации для различных типов организаций.

Результаты

Был проведен всесторонний анализ влияния интеграции стандартов ISO 9001:2015 и ISO 21500:2012 на показатели проектной деятельности организации. Наблюдения длились 6 месяцев, что позволило выявить устойчивые тренды в динамике ключевых метрик.

Предлагаемая модель представляет собой циклический процесс непрерывного улучшения, состоящий из пяти взаимосвязанных групп процессов:

– инициирование и стратегическое планирование;
– структурная декомпозиция и детальное планирование;
– реализация и мониторинг;
– управление изменениями и рисками;
– завершение и анализ эффективности.

Каждая из представленных процессных групп интегрирует требования стандартов ISO 9001 и ISO 21500, что обеспечивает синергетический эффект от их совместного применения. Критически важным элементом модели является межпроцессная интеграция, обеспечивающая согласованность действий и обмен информации между всеми участниками проектной деятельности. Эмпирическое тестирование разработанной модели продемонстрировало значимое улучшение ключевых показателей эффективности проектов (табл. 1).

Таблица 1

Результаты применения интегрированной модели управления проектами

Показатель	До внедрения модели	После внедрения модели	Изменение, %
Соблюдение сроков выполнения проектов	67,4 %	87 %	29,08 %
Удовлетворенность стейкхолдеров	73,8 %	89,1 %	20,73 %
Количество неточностей на этапе реализации (доработок)	6,3 (на проект)	4,7 (на проект)	–25,40 %
Среднее время обработки изменений	6,5 дней	3,4 дня	–47,69 %

Особого внимания заслуживает анализ преимуществ и ограничений предложенной модели интеграции стандартов ISO в проектное управление (табл. 2).

Таблица 2

Преимущества и ограничения интеграции стандартов ISO
в управление проектами

Преимущества	Ограничения
Системная стандартизация проектных процессов	Необходимость значительных временных затрат на начальном этапе внедрения
Прозрачность распределения ответственности	Возможное увеличение документационной нагрузки
Формализация процедур принятия решений	Риск бюрократизации проектов деятельности
Снижение операционных рисков	Потребность в специальном обучении персонала
Улучшение коммуникации между участниками проекта	Возможное сопротивление персонала изменениям
Стандартизация метрик оценки прогресса и результатов	Необходимость адаптации к специфике конкретной организации
Обеспечение преемственности и тиражируемости успешных практик	Затраты на сертификацию и аудиты
Повышение прогнозируемости результатов	Сложности при интеграции с существующими корпоративными системами

Разработанная процессная модель совершенствования управления проектами предполагает циклическое выполнение следующих этапов:

– диагностический анализ текущей системы управления проектами;
– разработка процессной архитектуры интегрированной системы;
– формирование нормативно-методической базы;
– внедрение процессной модели и проведение пилотных проектов;
– оценка результативности и определение областей для улучшения;
– стандартизация и масштабирование успешных практик.

Для каждого из перечисленных этапов определены конкретные инструменты и методы, обеспечивающие эффективную интеграцию и требований стандартов ISO в проектную деятельность организации.

Обсуждение

Анализ полученных результатов позволяет сформировать целостное представление о механизмах и эффектах интеграции стандартов ISO в системы управления проектами. Предложенная процессная модель демонстрирует эффективность, что подтверждается значительным улучшением ключевых показателей проектной деятельности в исследуемой организации. Особую значимость представляет выявленная корреляция между степенью интеграции требований ISO 9001 и ISO 21500 и показателями успешности проектов. Установлено, что наибо-

лее существенное влияние на эффективность проектного управления оказывают следующие элементы стандартов:

– риск-ориентированный подход (ISO 9001:2015, п. 6.1), позволяющий идентифицировать и управлять рисками на всех этапах жизненного цикла проекта. Интеграция данного подхода в проектную деятельность обеспечивает снижение вероятности срыва сроков и превышения бюджета в среднем на 30%;

– процессный подход (ISO 9001:2015, 4.4), создающий методологическую основу для декомпозиции проектной деятельности на взаимосвязанные процессы с четко определенными входами, выходами и критериями результативности;

– структурирование проектной деятельности по предметным группам (ISO 21500:2012, p. 4), что обеспечивает комплексный охват всех аспектов управления проектом – от управления содержанием до управления заинтересованными сторонами;

– документированная информация (ISO 9001:2015, п. 7.5), формирующая информационное пространство проекта и обеспечивающая прослеживаемость принимаемых решений.

Важно отметить, что эффективность интеграции стандартов ISO в проектную деятельность будет существенно различаться в зависимости от отраслевой принадлежности организации. Так, в высокотехнологичных отраслях будет наблюдаться наиболее высокий уровень улучшений, в то время как в традиционных секторах экономики (строительство, добывающая промышленность) эффект будет менее выражен. Данное расхождение обусловлено различной степенью зрелости систем управления и организационной культуры, что подтверждает гипотезу о необходимости адаптации предложенной модели к специфике конкретной организации.

Особого внимания заслуживает анализ факторов, ограничивающих применение интегрированной модели. Проведенный анализ показал, что наибольшие сложности при внедрении связаны с:

– недостаточной квалификацией проектных менеджеров в области стандартов ISO;

– отсутствием эффективной информационной системы поддержки проектной деятельности;

– сопротивлением персонала изменениям, воспринимаемым как дополнительная бюрократическая нагрузка.

Для преодоления указанных ограничений предлагается многоуровневая система трансформации проектного управления в организации, основанная на принципе постепенного наращивания зрелости процессов. Данная система предполагает последовательное прохождение пяти уровней:

– уровень 1 – базовый: формирование единого понятийного аппарата и методологических основ интеграции стандартов ISO в проектное управление;

– уровень 2 – формализованный: разработка и внедрение регламентирующей документации, определяющей порядок выполнения проектных процессов с учетом требований стандартов ISO;

– уровень 3 – измеряемый: внедрение системы метрик и ключевых показателей эффективности, позволяющих оценивать результативность интегрированной системы управления;

– уровень 4 – управляемый: формирование контуров управления проектными процессами на основе цикла PDCA (Plan-Do-Check-Act), обеспечивающих непрерывное совершенствование;

– уровень 5 – оптимизирующий: активное использование инновационных подходов и методов улучшения проектных процессов, основанных на количественном анализе и прогнозировании.

Критический анализ полученных результатов позволяет полагать, что основной сложностью при интеграции стандартов ISO в проектное управление является поиск баланса между необходимой степенью формализации процессов и обеспечением гибкости, критически важной для динамичной проектной среды. Решение данной проблемы видится в адаптивном применении требований стандартов с учетом категории проекта, его масштаба и степени инновационности.

Сравнительный анализ разработанной модели с существующими подходами к совершенствованию проектного управления (CMMI for Development, OPM3, P3M3) демонстрирует ее преимущества в части практической применимости и ориентации на создание реальной ценности для организации. В отличие от указанных моделей зрелости, предложенный подход не просто диагностирует текущее состояние системы управления проектами, но и предоставляет конкретные инструменты для ее совершенствования на основе требований международных стандартов.

В контексте современных тенденций цифровой трансформации бизнеса особое значение приобретает встраивание разработанной модели в цифровую экосистему организации.

Заключение

Разработанная интегрированная процессная модель представляет собой инструмент повышения результативности проектной деятельности, что подтверждается значительным улучшением основных показателей управления проектами в организации, применившей данный подход. Центральным элементом предложенной модели является синергетическая интеграция требований стандартов ISO 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования» и ISO 21500:2012 «Руководство по проектному менеджменту», обеспечивающая комплексный подход к построению системы управления проектами. Внедрение модели способствует устранению традиционных барьеров между проектным управлением и менеджментом качества, формируя единую методологическую и операционную платформу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ISO 9001:2015 Системы менеджмента качества. Требования: международный стандарт. – Женева: ISO, 2015.

2. ISO 21500:2012 Руководство по управлению проектами: международный стандарт. – Женева: ISO, 2012.

3. ISO 31000:2018 Управление рисками. Руководящие принципы: международный стандарт. – Женева: ISO, 2018.

4. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Sixth Edition / Project Management Institute. – Newtown Square, PA: PMI, 2017.

5. Pulse of the Profession 2018: Success in Disruptive Times / Project Management Institute. – Newtown Square, PA: PMI, 2018.

6. Kerzner H. Project Management Metrics, KPIs, and Dashboards: A Guide to Measuring and Monitoring Project Performance. – Hoboken, NJ: Wiley, 2017.

7. ISO/IEC 17020:2012 Оценка соответствия. Общие критерии функционирования различных типов органов контроля: международный стандарт. – Женева: ISO/IEC, 2012.

© М. С. Приморский, А. В. Шабурова, 2025

УДК 004.932.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-364-371

И. В. Борисова[1]✉, Н. Д. Герасимова[1]

Итерационная фильтрация для восстановления размытых изображений

[1] Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: i.v.borisova@corp.nstu.ru

Аннотация. Предлагается метод расчета числа итераций для восстановления размытых полутоновых изображений по фрагментам наблюдаемого изображения. Показано, что применение рассчитанного числа итераций в процедуре восстановления изображения в целом обеспечивает качество деконволюции на уровне параметрического фильтра Винера. Предложен алгоритм восстановления размытых изображений за один проход.

Ключевые слова: восстановление изображений, итерационный метод, число итераций

I. V. Borisova[1]✉, N. D. Gerasimova[1]

Iterative Filtering for Restoring Blurred Images

[1] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: i.v.borisova@corp.nstu.ru

Abstract. A method for calculating the number of iterations for restoring blurred halftone images is proposed. The number of iterations is calculated from the fragments of the observed image. It is shown that this number of iterations restores the entire image with the quality of the parametric Wiener filter. A one-step algorithm for restoring blurred images is proposed instead of an iterative one.

Keywords: image restoration, iterative method, number of iterations

Введение

Итерационные методы восстановления искаженных изображений имеют ряд преимуществ по сравнению с инверсной фильтрацией. Они более устойчивы к шуму и неточному заданию передаточной функции искажающей системы. При итерационной процедуре возможно наложение ограничений на промежуточные результаты восстановления или их фильтрация. Кроме того, в процессе восстановления можно корректировать передаточную функцию, добиваясь лучшего результата. Для построения автоматизированной системы необходимо определять момент останова итерационной процедуры. Необходимое число итераций определяется из решения задачи минимизации функционала ошибки [1] или на основе эталонных и безэталонных мер качества изображения [2].

Расчет числа итераций обычно выполняется в процессе фильтрации по всему изображению, хотя в [3] показано, что основываясь на характерном фрагменте наблюдаемого изображения и его отретушированной версии, можно найти параметры фильтра и необходимое число итераций.

В данной работе рассмотрена возможность расчета числа итераций по фрагментам полутонового изображения, обсуждена зависимость качества восстановления от типа выбранного фрагмента и показан переход от итерационной процедуры к восстановлению за один проход.

Итерационная схема восстановления

Будем считать, что наблюдаемое дискретное изображение $s(x, y)$ есть результат воздействия линейной искажающей системы с импульсной характеристикой $h(x, y)$ на исходное (идеальное) изображение $u(x, y)$ и добавления шума $n(x, y)$:

$$s(x,y) = f[u] = h(x,y) \otimes u(x,y) + n(x,y), \tag{1}$$

где $\otimes$ означает линейную циклическую свертку, $f[\cdot]$ – искажающий фильтр.

В формуле (1) s, h, u, n предполагаются периодически продолженными. Тогда спектр наблюдаемого изображения будет иметь вид:

$$S(\omega_x,\omega_y) = F(\omega_x,\omega_y) = H(\omega_x,\omega_y)U(\omega_x,\omega_y) + N(\omega_x,\omega_y), \tag{2}$$

где S, F, H, U, N – дискретные спектры Фурье s, f, h, u, n соответственно.

Итерационный подход к восстановлению изображений позволяет выполнять фильтрацию при неполных априорных данных об искажающей системе и в присутствии шумов. В общем виде итерационная схема деконволюции может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} u^{(0)}(x,y) &= s(x,y), \\ u^{(i+1)}(x,y) &= u^{(i)}(x,y) + \tau\left(s(x,y) - f[u^{(i)}]\right), \end{aligned} \tag{3}$$

где $u^{(i)}$ – оценка исходного изображения на i-ой итерации, τ – коэффициент релаксации.

Для сходимости алгоритма (3) необходимо, чтобы на всех частотах выполнялось неравенство

$$\left|1 - \tau H(\omega_x,\omega_y)\right| < 1. \tag{4}$$

Если $\tau = 1$, то алгоритм (3) является схемой Ван Циттерта [4, с. 219-221], требование (4) накладывает жесткие ограничения на передаточную функцию, а отсутствие регуляризации усиливает шум.

Итерационные схемы с коэффициентом релаксации $0 < \tau < 1$ применялись для восстановления изображений в оптико-электронных системах [5]. В более поздних работах [6, 7] показано, что этот подход соответствует поиску решений методом простых итераций, а искажающий фильтр для оценок $u^{(i)}$, близких к исходному изображению u, должен удовлетворять условию Липшица:

$$\left\| f[u^{(i)}] - f[u^{(i+1)}] \right\| \le (1 + 2|\tau|) \left\| u^{(i)} - u^{(i+1)} \right\|.$$

Следует заметить, что при восстановлении с $\tau = \text{const}$ в итерационной схеме (3) не учитывают шум, заложенный в модели искажения и реально присутствующий на наблюдаемом изображении. Поэтому часто для изображений на каждой итерации вводятся ограничения по яркости или проводится дополнительная фильтрация [8], что делает алгоритм деконволюции нелинейным.

Чтобы учесть шум, выполним аппроксимацию (1) линейной сверткой:

$$s(x, y) = f[u] \approx k(x, y) \otimes u(x, y),$$

где k – ядро размытия.

Тогда, после перехода в частотную область, итерационная схема (3) принимает вид:

$$U^{(0)}(\omega_x, \omega_y) = S(\omega_x, \omega_y),$$
$$U^{(i+1)}(\omega_x, \omega_y) = U^{(i)}(\omega_x, \omega_y) + \tau^{(i)} \left(S(\omega_x, \omega_y) - K^{(i)}(\omega_x, \omega_y) U^{(i)}(\omega_x, \omega_y) \right), \quad (5)$$
$$K^{(i)} = \frac{H(\omega_x, \omega_y) U^{(i)}(\omega_x, \omega_y) + N^{(i)}(\omega_x, \omega_y)}{U^{(i)}(\omega_x, \omega_y)}.$$

В [9] вводится схема Ван Циттерта с фазовой коррекцией, в которой коэффициент релаксации рассчитывается для каждой итерации:

$$\tau^{(i)} = \frac{\left(K^{(i)} \right)^*}{\left| K^{(i)} \right| + \varepsilon}, \quad (6)$$

где ()* означает комплексное сопряжение, ε – малое число, вводимое, чтобы избежать деления на ноль.

Условие сходимости в этом случае более мягкое чем (4) и имеет вид:

$$\max_{\omega_x,\omega_y}\left|1-\frac{\left|K(\omega_x,\omega_y)\right|^2}{\left|K(\omega_x,\omega_y)\right|+\varepsilon}\right|<1.$$

Расчет числа итераций

Основным недостатком итерационного подхода к восстановлению изображений является необходимость многократного выполнения свертки фильтра с изображением. При больших размерах изображений эта процедура, даже выполняемая в спектре Фурье, может потребовать существенного времени. Критерии остановки итерационного процесса основаны на некоторых критериях качества восстановленного изображения [10] или на разности приближений на соседних итерациях [11, 12].

Если от итерации к итерации коэффициент релаксации и ядро размытия не изменяются, то алгоритм (3), опуская параметры (x, y), может быть переписан следующим образом:

$$u^{(i)} = s + i\tau s - i\tau h \otimes s + \sum_{k=2}^{i}(-1)^k C_i^k \tau^k h^{(k)} \otimes s + \sum_{k=2}^{i}(-1)^{k-1} C_i^k \tau^k h^{(k-1)} \otimes s, \qquad (7)$$
$$h^{(k)} = \underbrace{h \otimes h \otimes \ldots \otimes h}_{k}$$

где $C_i^k = \dfrac{i!}{k!(i-k)!}$ – число сочетаний; τ=const.

Переходя из пространственной области в спектральную, вместо сверток в (7) получим многочисленные поточечные перемножения матрицы H, то есть поэлементное возведение в степень. Эти перемножения можно выполнить заранее и хранить в памяти. Таким образом, если известно необходимое для восстановления число итераций, то, применяя (7) в пространственной или частотной области, можно выполнить деконволюцию за один шаг и существенно сократить объем вычислений.

Аналогичную формулу можно вывести и для итераций в частотной области с фазовой коррекцией, если $K^{(i)} = H(\omega_1, \omega_2)$, то формулы (5, 6) приводят к следующему алгоритму:

$$U^{(i)} = S + i\frac{H^*}{|H|}S - i|H|S + \\ + \sum_{k=2}^{i}(-1)^k C_i^k \left(H^*/|H|\right)^k H^k S + \sum_{k=2}^{i}(-1)^{k-1} C_i^k \left(H^*/|H|\right)^k H^{k-1} S. \quad (8)$$

Проблему с неизвестным заранее числом итераций можно решить, если просчитать необходимое число итераций по небольшому фрагменту, взятому из искаженного изображения, а затем воспользоваться формулой (7) или (8) для всего изображения.

Экспериментальные результаты

Рассмотрим применение итерационного подхода для восстановления смазанного и расфокусированного изображения, на которое наложен шум, подчиняющийся нормальному закону распределения. Значение пикового отношения сигнала к шуму (PSNR) зашумленного изображения без искажений составляет 60 дБ. Пример исходного изображения приведен на рис. 1. На рис. 2 показано ядро размытия (масштаб увеличен для наглядности). На рис. 3 приведено искаженное и зашумленное изображение.



Рис. 1.
Исходное изображение

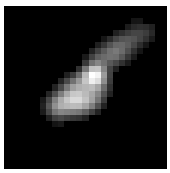


Рис. 2.
Ядро размытия

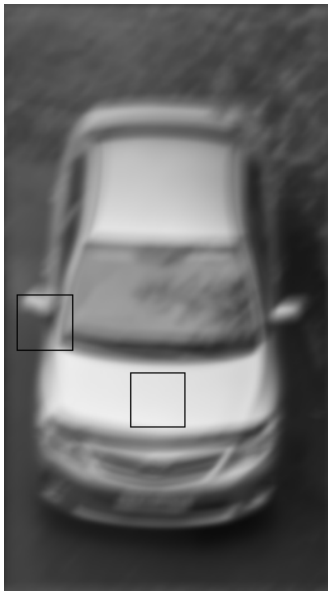


Рис. 3.
Искаженное изображение

Для расчета числа итераций по формулам (7, 8) на искаженном изображении были выбраны два фрагмента, показанные квадратами на рис. 3. Фрагмент с зеркалом автомобиля (будем называть его фрагмент 1) содержит существенные перепады яркости. На фрагменте с капота автомобиля (фрагмент 2) яркость практически постоянна.

Для остановки итерационного процесса проверялась разность полученных оценок изображения на соседних итерациях:

$$\xi^{(i)} = \frac{1}{XY}\sum_{x=1}^{X}\sum_{y=1}^{Y}\left|u^{(i)}(x,y) - u^{(i-1)}(x,y)\right|.$$

Если было достигнуто значение $\xi^{(i)} < 10^{-6}$, то итерационный процесс останавливался. При расчете по формуле (7) при $\tau = 0{,}1$ для фрагмента 1 необходимое число итераций составило 81, тогда как для фрагмента 2 – только 13. При восстановлении всего изображения по формуле (3) при этом же τ потребовалось 80 итераций (PSNR = 24,29 дБ). При восстановлении изображения за 81 итерацию PSNR = 24,33 дБ (рис. 4), а за 13 итераций – 23,74 дБ. После 13 итераций изображение выглядит слишком размытым. Визуально результат восстановления за 80 и 81 итерацию не отличается, видно, что присутствуют ложные контуры, и четкость до конца не восстановлена.

Для сравнения было выполнено восстановление по формуле Винера с заданным отношением дисперсий шума и наблюдаемого изображения. Результат показан на рис. 5, PSNR результата восстановления 33,45 дБ.

Также для сравнения выполнено восстановление с фазовой коррекцией и учетом шума по формуле (6). Потребовалось выполнить 52 итерации, PSNR=32,24 (рис. 6).



Рис. 4. Итерационное восстановление, $\tau = 0{,}1$



Рис. 5. Восстановление фильтром Винера



Рис. 6. Восстановление с фазовой коррекцией и учетом шума

При расчете по формуле (8) для фрагмента 1 необходимое число итераций составило 92, для фрагмента 2 – 39. При восстановлении всего изображения потребовалось 85 итераций (PSNR = 32,18 дБ). При восстановлении изображения за 92 итерации PSNR = 32,2 дБ, а за 39 итераций – 31,4 дБ. Результаты восстановления показаны на рис. 7.



а *б* *в*

Рис. 7. Восстановление с фазовой коррекцией без учета шума:
а – 39 итераций; *б* – 85 итераций; *в* – 92 итерации

Анализируя рис. 4-7, легко заметить, что итерационное восстановление с постоянным скалярным коэффициентом релаксации (рис. 4) дает худшие результаты, как визуально, так и по значению PSNR. Кроме того, требуется подбор значения τ. Восстановление фильтром Винера (рис. 5) дало лучший результат PSNR, но визуально не отличается от итерационного восстановления по формуле (8) при большом числе итераций, показанного на рис. 7(б, в). Восстановление с фазовой коррекцией и поправкой ядра на каждой итерации по формуле (6), рис. 6, потребовало меньше итераций, показало результаты PSNR на уровне восстановления с постоянным ядром, но визуально выглядит более размытым, чем изображения на рис. 7(б, в).

По результатам эксперимента можно сделать вывод о возможности расчета необходимого числа итераций по фрагментам изображения, но эти фрагменты должны содержать границы объектов, т.е. должны быть существенные перепады яркости. Следует отметить, что при выборе насыщенных деталями фрагментов

изображений расчетное число итераций может быть несколько завышено. Однако при хорошей сходимости итерационного процесса это не должно оказывать негативного влияния на результат. Для уточнения числа итераций рекомендуется выполнять расчет по нескольким фрагментам наблюдаемого изображения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жданов А.И., Иванов А.А. Оценка оптимального номера останова итераций при восстановлении импульсной характеристики искажающей системы // Компьютерная оптика. – Т. 34, № 3. –С. 367–373.

2. Бордюжа В., Брейкина К. В., Умняшкин С. В. Автоматизация определения числа итераций в задаче восстановления смазанных изображений методом Люси – Ричардсона // Известия вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 539–550.

3. Дроздов М.А., Зимин Д.И. Исследование методики определения параметров итерационной схемы реализации восстанавливающего фильтра // Компьютерная оптика. – 2004. – Т. 26. – С.129–132.

4. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг, Г. Эндрюс, Д. Фиасконаро и др.; Под ред. Т. Хуанга; Пер. с англ. Е.З. Сороки, В.А. Хлебородова. – М.: Мир, 1979. – 318 с.

5. Гибин И.С., Разумова И.И., Худик В.Н. Оптико-электронная система с программным формированием аппаратной функции в цепи обратной связи // Автометрия. – 1986. – № 2. – С. 69–74.

6. Tao X., Zhou C., Shen X., Wang J., Jia J. Zero-order reverse filtering // ICCV 2017: Proc. / IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, Italy, Oct. 22-29. – 2017. – P. 222–230.

7. Milanfar P. Rendition: Reclaiming what a black box takes away // SIAM Journal on Imaging Sciences. – 2018. – Vol. 11 (4). – P. 2722–2756.

8. Гуров И.П., Смирнов Д.С. Улучшение качества изображений методом Ван Циттерта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2002. – № 6. – С. 178–182.

9. Belyaev A.G., Fayolle P. Black-box image deblurring and defiltering – Signal Processing: Image Communication, [Электронный ресурс]. – 2022. – Vol. 108. – URL: https://doi.org/10.1016/j.image.2022.116833.

10. Липлянин А.Ю., Хижняк А.В. Методика определения требуемого значения показателя качества изображения для алгоритмов обнаружения в условиях искажений // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 3. – С. 69–75.

11. Сергеев В.В., Денисова А.Ю. Итерационный метод восстановления кусочно-постоянных изображений при известных границах областей // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 239–243.

12. Панфилова К. В. Компенсация линейного смаза цифровых изображений с помощью метода Люси-Ричардсона // Материалы Юбилейной 25-й Международной конференции (GraphiCon 2015), Россия, Протвино (Парк Дракино), 22–25 сентября 2015. – С. 163–167.

© И. В. Борисова, Н. Д. Герасимова, 2025

УДК 621.9.04:621.7:004.94
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-372-376

А. Н. Ларионов[1]✉

Комплексные решения для аддитивных производств. Проектирование и анализ прочности деталей, моделирование процесса 3D-печати

[1]АО «Научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Нижняя Салда, Российская Федерация
e-mail: andrei.larion0v@yandex.ru

Аннотация. Современные аддитивные технологии, используемые для 3D-печати металлов, требуют тщательного подхода к моделированию процессов. Вопрос о том, какое моделирование – компьютерное или натурное является более эффективным, остается актуальным. Компьютерное моделирование позволяет лучше контролировать процесс изготовления деталей и выявлять потенциальные проблемы до начала фактического производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, аддитивные технологии, оптимизация, цифровая модель, физический объект, 3D-принтер, проектирование, моделирование, опорная конструкция, параметры, трансформация, процесс

A. N. Larionov[1]✉

Comprehensive Solutions for Additive Manufacturing. Designing and Analyzing the Strength of Parts, Modeling the 3D Printing Process

[1]JSC “Scientific Research Institute of Mechanical Engineering”, Nizhny Salda, Russian Federation
*e-mail: andrei.larion0v@yandex.ru

Abstract. Modern additive technologies used for 3D printing of metals require a careful approach to process modeling. The question of which simulation is more effective, whether computer-based or field-based, remains relevant. Computer modeling allows you to better control the manufacturing process of parts and identify potential problems before the actual production begins.

Keywords: additive manufacturing, additive technologies, optimization, digital model, physical object, 3D printer, design, modeling, supporting structure, parameters, transformation, process

Проблемы отрыва от опорной плиты

Одной из самых серьезных проблем в процессе аддитивного производства является отрыв детали от опорной плиты. Неопределенность в этом вопросе может привести к серьезным последствиям, если проблема будет обнаружена только после завершения печати. При производстве металлических изделий с использованием аддитивных технологий необходимо учитывать множество факторов, включая термомеханические деформации и напряжения, возникающие во время печати. Эти явления могут существенно повлиять на качество конечного продукта, вызывая такие проблемы, как искажение формы и снижение прочности [1]. Решение данной проблемы требует применения высококачественных материалов и технологий, а также оптимизации параметров печати, таких как тем-

пература и скорость, которые могут помочь избежать отрыва детали [2]. Для оценки напряжений, действующих на деталь во время печати, можно использовать формулу

$$\sigma = \frac{F}{A}, \tag{1}$$

где σ – напряжение (Па); F – сила, действующая на деталь (Н); A – площадь поперечного сечения детали (м^2).

Рассмотрение данной формулы поможет понять, какие величины могут вызвать отрыв детали от опорной плиты, если приложенные силы превышают допустимые значения.

Характеристики титана и его влияние на печать

Титан, который становится все более популярным в аддитивном производстве, имеет высокую точку плавления и плохую теплопроводность. Это приводит к накоплению тепла и, как следствие, к деформациям опорной плиты. Титан также обладает высокой прочностью и коррозионной стойкостью, что делает его идеальным для создания высоконагруженных компонентов, таких как детали для авиационной и промышленности, но есть сложности в обработке и высокие затраты на производство, это ограничивает массовое применение [3]. Температура плавления титана составляет около 1668°C, что требует точного контроля температуры во время печати. Для расчета теплового потока, возникающего в процессе печати, можно использовать формулу

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\left(T_{\text{вход}} - T_{\text{выход}}\right)}{d}, \tag{2}$$

где Q – тепловой поток (Вт); k – коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·К)); A – площадь поверхности (м^2); $T_{\text{вход}}$ и $T_{\text{выход}}$ – температуры на входе и выходе (К); d – толщина материала (м).

Если производственный цикл не начинается с отрыва детали от плиты, то релаксационная термообработка может снизить остаточные напряжения, однако остаточные деформации все равно будут присутствовать и могут выходить за пределы допустимых норм [4]. Поэтому важно учитывать режимы печати и выбирать оптимальные параметры для минимизации термических эффектов.

Необходимость диалога между проектировщиком и производителем

Для успешного аддитивного производства требуется активный диалог между проектировщиком и производителем. Чем выше уровень компетентности проектировщика, тем быстрее можно запустить нужную деталь в производство. Инженеры должны учитывать позиционирование детали в камере принтера и ми-

нимизировать высоту печатаемого слоя, поскольку это влияет на стоимость и время печати. Также важно, чтобы проектировщики были осведомлены о возможностях и ограничениях используемого оборудования, поскольку это поможет избежать ошибок при трансформации цифровой модели в физический объект [5]. Взаимодействие между различными командами инженеров, проектировщиков 3D-принтеров является необходимым условием для эффективного процесса разработки.

Оптимизация процесса печати включает в себя минимизацию объема поддерживающих структур и расходов на их удаление. Для расчета оптимальной высоты печатаемого слоя можно использовать следующую формулу

$$h_{\text{опт}} = \frac{D_{\text{макс}}}{n}, \tag{3}$$

где $h_{\text{опт}}$ – оптимальная высота слоя (м); $D_{\text{макс}}$ – максимальный размер детали (м); n – число слоев, необходимых для полной печати.

Несмотря на то, что такая ориентация детали может быть неблагоприятной для коробления, ранняя проверка параметров печати может значительно снизить необходимость внесения изменений в конструкцию [6]. Важным аспектом является использование методов топологической оптимизации, которые позволяют распределять материал только в тех местах, где он действительно необходим, что также способствует снижению веса и стоимости конечного продукта. Кроме того, технологии, такие как адаптивное управление параметрами печати в зависимости от текущего состояния процесса, могут значительно повысить качество деталей и снизить количество брака [7].

Существует множество программных решений, которые могут помочь в процессе проектирования. Эти инструменты позволяют быстро вносить изменения и минимизировать риски, такие как поломка 3D-принтера из-за неправильно рассчитанных параметров [8]. Специализированные программные продукты позволяют проводить калибровку моделей, основанных на обобщенных данных о работе 3D-принтеров, что значительно улучшает результаты печати. Например, программы могут использовать алгоритмы машинного обучения для анализа данных о предыдущих печатях и предсказывать оптимальные параметры для новых задач [9]. Примеры параметров основаны на стандартных диапазонах аддитивных процессов титана, например, L-PBF – лазерное порошковое спекание (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры 3D-печати титана марки Ti-6Al-4V технологией лазерного порошкового спекания L-PBF

Параметр	Значение 1	Значение 2	Значение 3	Отмеченные условия
Температура (°C)	900	950	1000	Контролируемая в печатной камере
Мощность лазера (Вт)	150	200	180	Влияет на спекание порошкового титана
Скорость печати (мм/с)	500	600	550	Оптимизирована для минимизации деформаций
Толщина слоя (мкм)	30	20	25	Зависит от детализации и скорости
Атмосфера	Аргон	Гелий	Аргон	Защищает от окисления

Моделирование и его результаты

Моделирование позволяет предвидеть проблемные области в процессе производства. На различных стадиях проектирования можно использовать результаты моделирования см. табл. 2, чтобы избежать непредвиденного локального разрушения опорной конструкции [10]. Результаты компьютерного моделирования дают возможность четко видеть зоны максимального смещения и риска отрыва детали от опорной плиты, а также вести наблюдение за значениями отдельных параметров после завершения процесса (см. табл. 2). Регулярное использование моделирования на всех этапах проектирования и производства может существенно увеличить общую эффективность процесса и снизить затраты на исправление ошибок [11].

Таблица 2

Результаты моделирования аддитивных процессов титана марки Ti-6Al-4V

Параметр	Значение 1	Значение 2	Значение 3
Плотность (%)	99,5	99,8	99,4
Твердость (HV)	350	370	360
Пористость (мм/с)	0,5	0,3	0,6
Напряжения (МПа)	300	280	310
Деформация (мм)	0,1	0,08	0,12

Необходимо отметить, что компьютерное моделирование предоставляет множество преимуществ перед натурным. Оно позволяет не только отслеживать

и предотвращать возможные проблемы, но и оптимизировать процесс печати с помощью специализированного программного обеспечения, это необходимый инструмент для проектировщиков, работающих в области аддитивного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гибсон, И., Розен, Д. В., Стакер, Б. Аддитивные технологии: 3D-печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / И. Гибсон, Д. В. Розен, Б. Стакер. – Москва: Springer, 2010. – 450 с.
2. Вохлерс, Т. Отчет Вохлерса 2020: Состояние отрасли 3D-печати и аддитивного производства / Т. Вохлерс.: Wohlers Associates, 2020. – 300 с.
3. Редди, Б. В. М., Шанкар, Р. Конечные элементы анализа процессов аддитивного производства / Б. В. М. Редди, Р. Шанкар // Журнал производственных процессов. – 2018. – Т. 35. – С. 123–130. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.09.023.
4. Куо, К. Дж. Тепловой анализ процессов 3D-печати / К. Дж. Куо // Научные материалы. – 2018. – Т. 919. – С. 123–130.
5. ASTM International. Стандартный гид по аддитивному производству / ASTM F2792-12. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.astm.org/Standards/F2792.htm. – Дата обращения: 30.04.2025.
6. MSC Software. Simufact Additive. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mscsoftware.com/product/simufact-additive. – Дата обращения: 30.04.2025.
7. Engineering Reality. Engineering Reality Magazine. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mscsoftware.com/resources/engineering-reality. – Дата обращения: 30.04.2025.
8. Степанов, И. А., Кудрявцев, А. В. Программные средства для моделирования процессов 3D-печати / И. А. Степанов, А. В. Кудрявцев // Научно-технический вестник. – 2021. – № 4. – С. 45–52.
9. Михайлов, Н. С. Применение машинного обучения в аддитивном производстве / Н. С. Михайлов // Журнал новых технологий. – 2020. – Т. 15. – С. 78–85.
10. Петров, В. Г. Моделирование процессов аддитивного производства / В. Г. Петров, А. Н. Смирнов // Инженерные системы. – 2019. – Т. 12. – С. 23–30.
11. Кузнецов, А. В. Оптимизация процессов 3D-печати: современные подходы и технологии / А. В. Кузнецов // Вестник инженерных наук. – 2020. – Т. 8. – С. 34–40.

© А. Н. Ларионов, 2025

УДК 623.546
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-377-382

Е. В. Проскуряков[1]✉, А. Е. Фарахова[1], М. А. Анисова[2]

Вопросы баллистики гранат

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2] Новосибирский государственный университет», г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: saper67@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены расчетные и экспериментальные данные максимальной дальности полета: ручных осколочных гранат РГО и РГН; выстрелов осколочных гранатометных ВОГ-17 к автоматическому станковому гранатомету АГС-17; выстрелов осколочных гранатометных ВОГ-25 к гранатомету подствольному ГП-25; осколочных гранат ОГ-7 к ручному противотанковому гранатомету РПГ-7; термобарических боеприпасов к реактивному пехотному огнемету РПО-А, предназначенных для поражения живой силы и техники противника. Для всех вышеперечисленных боеприпасов, за исключением ручных осколочных гранат РГО и РГН, расчетные значения значительно отличаются от экспериментальных значений.

Ключевые слова: дальность полета, осколочные гранаты, ручные осколочные гранаты, выстрелы осколочные гранатометные, сопротивление воздуха, баллистический коэффициент.

E. V. Proskuryakov[1]✉, A. E. Farakhova [1], M. A. Anisova [2]

Issues of Grenade Ballistics

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2] Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: saper67@mail.ru

Abstract. This paper presents calculated and experimental data on the maximum flight range of: RGO and RGN hand fragmentation grenades; VOG-17 fragmentation grenade launchers to the AGS-17 automatic machine-gun grenade launcher; VOG-25 fragmentation grenade launcher shots to GP-25 under-barrel grenade launcher; OG-7 fragmentation grenades to RPG-7 hand-held anti-tank grenade launcher; thermobaric ammunition for the RPO-A rocket-propelled infantry flamethrower, designed to destroy enemy manpower and equipment. For all of the above ammunition, with the exception of RGO and RGN hand fragmentation grenades, the calculated values differ significantly from the experimental values.

Keywords: flight range, fragmentation grenades, hand fragmentation grenades, grenade fragmentation rounds, air resistance, ballistic coefficient.

Введение

Опыт современных войн и вооруженных конфликтов позволяет говорить о востребованности ручных гранат, гранатометных выстрелов для применения в Вооружённых Силах РФ и зарубежных армиях. На тактическом уровне ведения боевых действий применение данного вида оружия часто является единственно доступным средством поражения техники, укрепленных огневых позиций, групп пехоты и других объектов противника. Дальнобойность оружия – это совокуп-

ность свойств, характеризующих возможность эффективной стрельбы в зависимости от дальности – зачастую является определяющей характеристикой, когда необходимо подавить цель, находящуюся на предельных расстояниях его возможностей. При этом максимальная дальность полета гранат, гранатометных выстрелов и пр., то есть кратчайшее расстояние между точкой вылета и точкой падения (разрыва) боеприпаса, указанная в характеристиках оружия, на практике зачастую оказывается значительно выше.

Целью данной работы является сравнить расчетные и экспериментальные данные максимальной дальности полета осколочных и зажигательных гранат, предназначенных для поражения техники, укрепленных огневых позиций, групп пехоты и других объектов противника.

Методы и материалы

В работе представлены расчетные и экспериментальные данные максимальной дальности полета осколочных и зажигательных гранат (табл. 1), предназначенных для поражения живой силы и техники противника.

Таблица 1

Максимальная дальность полета гранаты L

№	Граната	d, мм	m, кг	V_0, м/с	L, м	L^*, м	$\frac{\Delta L}{L}$	$\frac{F}{P}$
1	РГН	61	0,3	20	40	40	0	0,2
2	РГО	60	0,5	19	36	36	0	0,1
3	ГП-25	40	0,25	76	570	400	0,3	1,8
4	РПО-А	93	4	125	1562	1200	0,3	1,8
5	АГС-17	30	0,35	185	3420	1700	0,5	4
6	РПГ-7В	40	2	140	1900	700	0,6	5

Здесь $\Delta L = L - L^*$

Обычно начальная скорость гранаты невелика (табл. 1, № 1,2) и сила сопротивления воздуха не учитывается. Метание ручных осколочных гранат осуществляется вручную. Ручные осколочные гранаты подразделяются на наступательные и оборонительные. Наступательные гранаты применяются в наступательном бою и имеют относительно малый радиус поражения осколками L_1 (рис. 1).

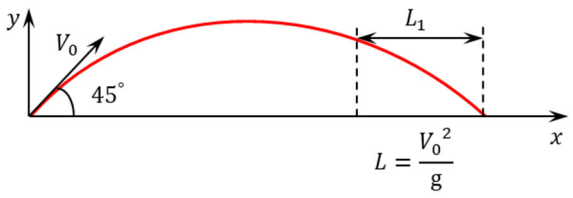


Рис. 1. Движение гранаты под углом к горизонту:

L – максимальная дальность полета гранаты; L_1 – дальность разлета осколков гранаты; V_0 – начальная скорость гранаты; g – ускорение свободного падения

Корпус гранаты РГН (рис. 2, *а*) изготовлен из легкого алюминиевого сплава и образует осколки с небольшим радиусом поражения. Оборонительные гранаты имеют относительно большой радиус поражения осколками и применяются из укрытий. Граната РГО (рис. 2, *б*) имеет двухслойный стальной корпус, значительно большую массу и формирует осколки с увеличенным радиусом поражения L_1.



а *б*

Рис. 2. Ручные осколочные гранаты:

а – РГН; *б* – РГО

Пусть V_0 – начальная скорость гранаты, g – ускорение свободного падения, максимальная дальность полета гранаты рассчитывается по формуле (рис. 1):

$$L = \frac{V_0^2}{g}, \qquad (1)$$

В данной модели дальность полета гранаты не зависит от ее массы и диаметра.

Дальность метания 40-мм гранаты ВОГ-25 (выстрел осколочный гранатометный – 25 модель) из подствольного гранатомета ГП-25 (рис. 3) превосходит дальность броска (табл. 1) и подствольные гранатометы значительно повышают эффективность применения гранат в бою.



Рис. 3. Гранатомет подствольный ГП-25 (вверху) и граната ВОГ-25П (внизу)

Граната ВОГ-17М (выстрел осколочный гранатометный – 17 модель) для 30-мм автоматического станкового гранатомета АГС-17 (рис. 4) стабилизируется в полете вращением, АГС-17 имеет высокую дальность прицельной стрельбы (1700 м) и скорострельность (выстрел в секунду и более).



Рис. 4. Автоматический гранатомет на станке АГС-17 (слева)
и граната ВОГ-17 (справа)



Рис. 5 Ручной противотанковый гранатомет РПГ-7 (вверху),
осколочная граната ОГ-7В и ОГ-7В с раскрытым хвостовым оперением (внизу)



Рис. 6. Реактивный пехотный огнемет РПО-А (слева) и термобарические
боеприпасы к нему (справа)

В некоторых случаях (табл. 1, № 3-6) расчетные значения L значительно отличаются от экспериментальных значений L^*. Оценим влияние сопротивления воздуха на скорость гранаты в одномерной постановке.

Пусть граната массой m и калибром d вылетает из оружия с начальной скоростью V_0. Сила сопротивления воздуха F рассчитывается по формуле:

$$F = C_x \cdot \rho_B \cdot V^2 \cdot \frac{S}{2} \qquad (2)$$

Плотность воздуха $\rho_B = 1{,}2 \, кг/м^3$ площадь поперечного сечения гранаты $S = \frac{\pi d^2}{4}$, коэффициент лобового сопротивления гранаты $C_x = 1$. Определим зависимость скорости гранаты V от пройденного расстояния x. Запишем дифференциальное уравнение движения гранаты и проинтегрируем его:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = -C_x \cdot S \cdot \frac{\rho_B \cdot V2}{2}; \qquad m \cdot \frac{dV}{dx} = -\frac{1}{2} \cdot Cx \cdot S \cdot \rho_B \cdot V;$$

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{2m} \cdot C_x \cdot \rho_B \cdot S \cdot dx; \qquad \int_{V_0}^{V} \frac{dV}{V} = -\frac{C_x}{2m} \cdot S \cdot \rho_B \cdot \int_0^x dx; \tag{3}$$

$$\ln V - \ln V_0 = -\frac{C_x}{2m} \cdot S \cdot \rho_B \cdot x; \qquad V = V_0 \cdot exp(-\frac{C_x}{2m} \cdot S \cdot \rho_B \cdot x)$$

Скорость гранаты V на конечном участке траектории $x = V_0^2/g$ оценивается по формуле (3) и зависит от параметра: F/p (см. табл. 1).

Результаты

Расчетные значения максимальной дальности полета (1) выстрелов осколочных гранатометных ВОГ-17 и ВОГ-25, осколочных гранат ОГ-7 и термобарических боеприпасов к реактивному пехотному огнемету РПО-А, предназначенных для поражения живой силы и техники противника, значительно отличаются от экспериментальных значений.

Заключение

Если сила сопротивления воздуха F превышает вес гранаты $P = m \cdot g$, то влияние воздуха на конечную скорость гранаты (3) будет значительным. Например, если $F = 1{,}8 \cdot P$, то L снижается на 30 % (табл. 1, № 3, 4).

В случае АГС-17 (табл. 1, № 5) при $F = 4 \cdot P$ дальность L снижается в два раза. Дальность полета гранаты ОГ-7 существенно (на 60 %) снижается из-за наличия стабилизирующего оперения (табл. 1, № 6), сила сопротивления воздуха F оценивается величиной более $5 \cdot P$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабкин А.В. Средства поражения и боеприпасы: Учеб. / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Моск. гос. техн. ун-т, 2008.

© Е. В. Проскуряков, А. Е. Фарахова, М. А. Анисова, 2025

УДК 623.4
DOI 10.33764/2618-981X-2025-8-383-387

А. Е. Фарахова[1]✉, И. Б. Палымский[1]

Теоретическая оценка наибольшей суммарной энергии осколков при взрыве боеприпаса осколочного действия

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.farakhova@mail.ru

Аннотация. Современные боеприпасы осколочного действия широко применяются в вооружённых силах для поражения живой силы и техники противника. Оптимизация их характеристик, в том числе суммарной энергии осколков, имеет решающее значение для повышения эффективности боевого применения. На основе формулы Покровского для скорости осколков получена формула для суммарной кинетической энергии осколков, вычислено ее максимальное значение. Выполнено сравнение полученного максимального значения для энергии осколков с соответствующими значениями для боеприпасов различных типов. Теоретическая оценка предельной энергии осколков позволяет усовершенствовать конструкции боеприпасов, повысить их летальность и снизить расход взрывчатых веществ при сохранении высокой эффективности поражения целей.

Ключевые слова: взрыв, энергия, боеприпасы осколочного действия

A. E. Farakhova[1]✉, I. B. Palymskiy[1]

Theoretical estimation of the highest total energy of fragments during the explosion of a fragmentation munition

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.farakhova@mail.ru

Abstract. Modern fragmentation ammunition is widely used in the armed forces to destroy enemy manpower and equipment. Optimizing their characteristics, including the total energy of the fragments, is crucial to increase the effectiveness of combat use. Based on Pokrovsky's formula for the velocity of fragments, a formula for the total kinetic energy of fragments is obtained, and its maximum value is calculated. The obtained maximum value for the energy of fragments is compared with the corresponding values for ammunition of various types. The theoretical assessment of the maximum energy of fragments makes it possible to improve the design of ammunition, increase their lethality and reduce the consumption of explosives while maintaining high target destruction efficiency.

Keywords: explosion, energy, fragmentation ammunition

Введение

Боеприпасы осколочного действия один из старейших и наиболее распространенных типов вооружения основного назначения, к которому относят не только осколочные, но и все виды осколочно-фугасных боеприпасов, т. е. разделение боеприпасов на осколочные и осколочно-фугасные в значительной мере условно.

Назначение осколочных боеприпасов поражение практически всех типов целей за исключением бетонированных, подводных и тяжело бронированных. Осколочные боеприпасы наносят повреждение главным образом высокоскоростным потоком поражающих элементов, метаемых взрывом заряда бризантного взрывчатого вещества. Поражающие элементы представляют собой либо осколки естественного или заданного дробления, либо являются готовыми поражающими элементами. В меньшей степени поражение наносят продукты детонации заряда ВВ, в связи с чем основные требования, предъявляемые к осколочным боеприпасам, сводятся к получению максимального количества убойных поражающих элементов при возможно большем радиусе поражения.

Осколочные боеприпасы предназначены для поражения живой силы и незащищённой техники за счёт разлёта осколков при взрыве. Их принцип действия основан на следующих этапах:

1. Подрыв заряда

– в боеприпасе содержится взрывчатое вещество, которое детонирует при срабатывании взрывателя (ударного, дистанционного или программируемого).

2. Разрушение корпуса

– взрыв создаёт мощную ударную волну, разрушающую корпус боеприпаса.

– корпус разлетается на множество мелких осколков (естественное осколкообразование), либо специальные заранее подготовленные поражающие элементы (стальные шарики, нарезные сегменты) разлетаются в заданном направлении (программируемое осколкообразование).

3. Поражающий эффект

– осколки разлетаются со скоростью 1000–2000 м/с, создавая плотное поражающее поле.

– основные поражающие факторы — кинетическая энергия осколков и ударная волна.

– чем ближе цель к эпицентру взрыва, тем выше вероятность поражения.

Оптимизация характеристик осколочных боеприпасов, в том числе суммарной энергии осколков, имеет решающее значение для повышения эффективности боевого применения. На основе формулы Покровского для скорости осколков получена формула для суммарной кинетической энергии осколков, вычислено ее максимальное значение. Выполнено сравнение полученного максимального значения для энергии осколков с соответствующими значениями для боеприпасов различных типов.

Методы и материалы

Оценку суммарной энергии осколков при взрыве боеприпаса осколочного действия проведем по выведенной из закона сохранения энергии формуле Покровского:

$$U = \frac{D}{2}\sqrt{\frac{\beta}{2+\beta}}, \tag{1}$$

где D – скорость детонации; $\beta = \dfrac{m_{BB}}{M_0 - m_{BB}}$, – масса разрывного заряда боеприпаса, M_0 – общий вес боеприпаса.

И полученной на ее основе формуле для суммарной кинетической энергии осколков:

$$E_k = (M_0 - x)\frac{\dfrac{x}{M_0 - x}}{2 + \dfrac{x}{M_0 - x}}, \tag{2}$$

Дифференцируем E_k по x:

$$E_k^{`} = \frac{2M_0{}^2 - 4M_0x + x^2}{(2M_0 + x)^2}, \tag{3}$$

и приравниваем результат к 0:

$$\begin{array}{l} 2M_0{}^2 - 4M_0x + x^2 = 0 \\ x_{1,2} = M_0\left(2 \pm \sqrt{2}\right) \end{array}, \tag{4}$$

Итак, $x_1 = M_0(2 - \sqrt{2})$ – оптимальное значение массы ВВ. Второй корень (4) отбрасываем, так как масса ВВ не может быть больше массы боеприпаса.

Определяем значение коэффициента нагрузки:

$$\begin{array}{c} \beta_{опт} = \dfrac{m_{BB}}{M_0 - m_{BB}} = \dfrac{x_1}{M_0 - x_1} = \dfrac{M_0(2-\sqrt{2})}{M_0 - M_0(2-\sqrt{2})} \\ \beta = \dfrac{2-\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} = \sqrt{2} \end{array}, \tag{5}$$

И значение коэффициента наполнения:

$$\alpha_{опт} = \frac{m_{BB}}{M_0} = \frac{x_1}{M_0} = \frac{M_0(2-\sqrt{2})}{M_0}. \tag{6}$$

Выразим E_k через α и M_0:

$$\alpha = x / M_0,\ x = \alpha \cdot M_0$$

$$E_k = \frac{x(M_0 - x)}{2M_0 - x} = \frac{\alpha M_0 (M_0 - \alpha M_0)}{2M_0 - \alpha M_0} = M_0 \frac{\alpha(1-\alpha)}{2-\alpha}, \quad (7)$$

Величину Ek/M_0 (пропорциональна суммарной кинетической энергии осколков на единицу массы боеприпаса) изобразим как функцию коэффициента наполнения $0 < \alpha < 1$:

$$\frac{E_k}{M_0} = \frac{\alpha(1-\alpha)}{2-\alpha}, \quad (8)$$

Для расчёта значений коэффициента наполнения массу взрывчатого вещества и массу боеприпаса возьмем из справочных материалов [2].

Результаты

Вычислив среднее значение коэффициента наполнения α для различных видов боеприпасов осколочного действия и сравнив полученные значения с оптимальным, получаем результат, что при значении коэффициента нагрузки $\beta_{опт} = \sqrt{2} = 1,41$ или, что эквивалентно коэффициенту наполнения $\alpha_{опт} = 2 - \sqrt{2} = 0,586$ суммарная кинетическая энергия всей осколочной массы принимает максимальное значение.

Рассчитав значения коэффициентов наполнения, для осколочно-фугасных снарядов получаем $\alpha_{сн} = 0,155$, что составляет 26,4 % от оптимального значения; для осколочно-фугасных мин $\alpha_{м} = 0,203$ (34,6 %); для фугасных бомб $\alpha_{б} = 0,44$ (75 %).

Значения $\alpha_{сн}$, $\alpha_{м}$, $\alpha_{б}$ *и* $\alpha_{опт}$ показаны на рис 1, причём $\alpha_{сн} < \alpha_{м} < \alpha_{б} < \alpha_{опт}$.

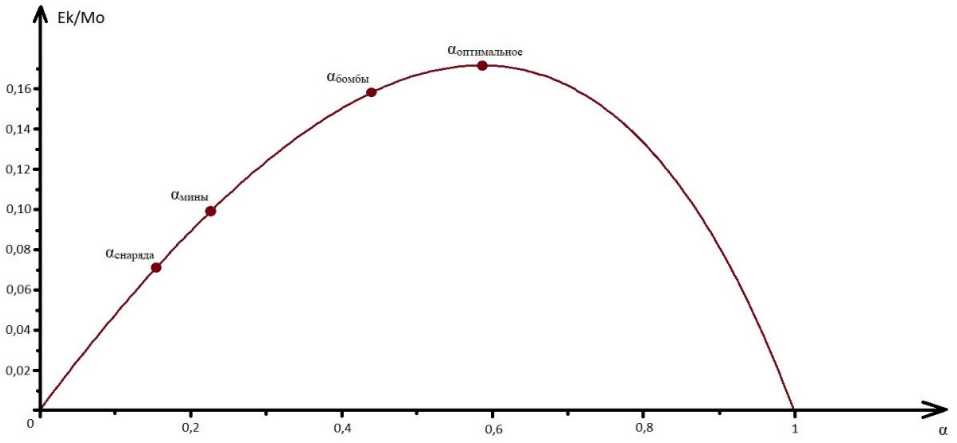


Рис. 1. Суммарная кинетическая энергия осколков как функция коэффициента наполнения.

По форме кривой видно, что для боеприпаса лучше иметь значение коэффициента наполнения меньше его оптимального значения, чем больше, так как при значении коэффициента наполнения большем оптимального кривая более крутая, что будет означать более быстрое уменьшение суммарной энергии осколочного поля. Для коэффициента наполнения для различных боеприпасов справедливо соотношение $\alpha_{сн} < \alpha_{м} < \alpha_{б} < \alpha_{опт}$. Наибольшую часть из возможной кинетической энергии осколков имеют бомбы и наименьшую – снаряды. Мины занимают в этом контексте промежуточное положение.

Заключение

Теоретическая оценка максимальной суммарной энергии осколков при взрыве боеприпаса осколочного действия является важным этапом в проектировании и модернизации вооружения. Проведённый анализ показал, что суммарная энергия осколков зависит от массы взрывчатого вещества и массы снаряда. Оптимизация этих параметров позволяет значительно повысить поражающий эффект боеприпаса, минимизируя потери энергии на нежелательные факторы, такие как ударная волна и тепловое излучение. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых моделей боеприпасов с улучшенными характеристиками. Из расчетов видно, что коэффициент наполнения для боеприпасов разный, но все значения меньше оптимального коэффициента наполнения.

Ближе всех к оптимальному значение коэффициента наполнения имеют бомбы, что связано с отсутствием значительных перегрузок при их полете. А наиболее отличается значение коэффициента наполнения от оптимального у снарядов, что обусловлено необходимостью выдерживать большие перегрузки при движении в стволе орудия. Мины в этом контексте занимают промежуточное положение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 1. Взрывные явления. Оценка и последствия; В 2х кн. Пер. с англ. / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.; Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б. Гельфанда.- М.: Мир, 1986.- 319 с.(т.1), 384 с.

2. Селиванов В.В. Боеприпасы: учебник: в 2т. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 508 с.

3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко.- В 2 т.-М.: Физматлит, 2002.

© А. Е. Фарахова, И. Б. Палымский, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. М. Е. Арапова, Е. Ю. Кутенкова. Фотонные кристаллы в оптическом приборостроении 3
2. А. М. Бахтиярова, В. Р. Костылева, М. С. Исмаилова, Т. В. Ларина. От Земли до звезд: новые материалы, преодолевающие пределы космических технологий 8
3. А. М. Бахтиярова, Е. Д. Моисеева, Д. В. Климова, Е. Г. Бобылева. Сравнение технологического процесса получения линзы в единичном и серийном производствах 14
4. С. М. Данилов, Е. Г. Бобылева, И. В. Парко. Технология «умного» окна 21
5. В. Р. Костылева, А. М. Бахтиярова, М. С. Исмаилова, И. В. Парко. Раскрывая тайны Вселенной: астрофотография для обнаружения и изучения космических объектов 25
6. В. Р. Костылева, А. М. Бахтиярова, М. С. Исмаилова, И. В. Парко. Новая эра Российского космостроения: перспективы в разработке космического флота 32
7. В. Р. Костылева, В. В. Ильин, И. В. Парко. Наблюдая космос по-новому: преимущества смарт-телескопов 39
8. Е. А. Лебедев, Е. Г. Бобылева. Решение проблемы деламинации триплекса 45
9. И. А. Выхристюк, С. Д. Жданов, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев. Исследование влияния неравномерности скорости сканирования на результаты измерения рельефа поверхности интерференционным профилометром 50
10. И. А. Выхристюк. Алгоритм контроля внешнего вида гильз с использованием искусственных нейронных сетей 61
11. И. Г. Пальчикова, Е. С. Смирнов. Линза с увеличенной глубиной фокуса 69
12. И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, А. Д. Ротарь, В. Г. Главный. Применение метода солевой метки для изучения многофазной гидродинамики 79
13. И. К. Кабардин, А. Д. Ротарь, В. Г. Меледин, К. С. Зубанов. Исследование распределения скорости из сопла Витошинского методом лазерной доплеровской анемометрии 88
14. М. Р. Гордиенко, И. К. Кабардин, П. Д. Лобанов, И. А. Евдокименко. Исследование всплытия газового пузыря оптическими и электроимпедансным методами 96

15. М. Р. Гордиенко, И. К. Кабардин, Н. А. Прибатурин, В. Г. Меледин. Диагностика всплытия имитатора газового пузыря оптическими и электроимпедансными методами 100
16. С. В. Какаулин, И. К. Кабардин. Исследование свойств источников освещения при повышении временного разрешения метода фазовой триангуляции 104
17. С. В. Какаулин, И. К. Кабардин. Оценка устойчивости регистрации изображений при вариации временного разрешения источников и приемников в методе фазовой триангуляции 109
18. К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин. Простой одночастотный дифференциальный оптический ЛДА 114
19. К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, В. В. Рахманов, А. М. Оборин. Оптимизация оптической схемы дифференциального оптического ЛДА 121
20. М. В. Кашкарова, Д. В. Литвинова, А. Ю. Кравцова. Цифровой двойник течения вязкой жидкости в т-миксере при неодинаковых расходах во входных каналах 128
21. М. В. Кашкарова, А. Ю. Кравцова. Визуализация λ_2-изоповерхностей вязкой жидкости в т-микроканалах при наложенных пульсациях 133
22. В. В. Рахманов, С. К. Качурин, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин. Исследование температурной зависимости коэффициента усиления микропиксельных лавинных фотоприемников 138
23. В. В. Рахманов, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, В. Г. Главный. Методика тестирования амплитудно-частотных характеристик фотоэлектронных умножителей 146
24. В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, В. А. Павлов. Метод фазовой триангуляции с адаптивной корректировкой приемно-передаточной функции 153
25. В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. А. Павлов. Адаптивный к оптическим свойствам поверхности триангуляционный контроль трехмерных деформаций 161
26. С. В. Двойнишников, В. В. Рахманов, В. О. Зуев, Г. В. Бакакин. Программно-аппаратная архитектура системы оптического контроля качества топливных таблеток 168
27. С. В. Двойнишников, В. В. Рахманов, В. А. Павлов, В. О. Зуев. Метод контроля дефектов боковой и торцевой поверхности топливных таблеток 174
28. А. М. Оборин, К. С. Зубанов, С. В. Двойнишников. Разработка программного обеспечения лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты 178
29. И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский. Особенности истечения газового пузыря через горизонтальный пучок труб в фиксированном объеме жидкости 186

30. С. М. Волков, Н. А. Гуляев, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский. Динамика газовых пузырей в кольцевом канале малого сечения 192
31. П. Д. Лобанов, А. И. Светоносов, Н.А. Прибатурин. Визуализация движения пузырей в жидком металле 197
32. Н. А. Гуляев, А. И. Светоносов, И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский. Экспериментальное исследование движения пузырей в вертикальном пучке стержней 203
33. А. А. Сырбаков, И. А. Зарубин, А. А. Дзюба, С. В. Додонов. Согласование параметров эшелле-решетки с размерами фотоприемной матрицы 208
34. И. А. Евдокименко, Д. Е. Легостаев, К. А. Филиппский. Движение пузырей в нисходящем потоке через пучок горизонтальных труб 214
35. А. В. Чинак. Кластеризация монодисперсных пузырей в наклонной трубе 218
36. М. А. Воробьев, А. О. Кархов. Применение теневого фонового метода для измерения плотностной стратификации в водно-соляном растворе 223
37. М. А. Воробьев, А. О. Кархов. Влияние поверхностно-активных веществ на скорости всплытия пузырей в наклонном канале 229
38. М. В. Кашкарова, С. В. Какаулин, К. С. Зубанов, А. Ю. Кравцова. Цифровая визуализация кавитационного обтекания крыла в щелевом канале 234
39. А. А. Гусейнов, Д. В. Литвинова, А. Ю. Кравцова. Юстировка комплекса цифровой трассерной визуализации для исследований течений жидкости в микроканалах с препятствиями 238
40. Д. Н. Титов, Е. В. Рыжкова. Применение ИИ в интернете вещей 242
41. А. А. Киселев, В. М. Белов. Методика оценивания уровня защищенности объектов КИИ с использованием нечеткой логики 246
42. М. Б. Абилев, Д. Ерболат, А. В. Троеглазова. Фотолюминесцентные свойства диоксида циркония 253
43. Н. В. Прохоренкова, А. М. Жилкашинова, А. В. Троеглазова. Вакуумные технологии нанесения радиопоглощающих покрытий 261
44. А. А. Имашева, К. Акатан, А. В. Троеглазова, С. К. Кабдрахманова. Качественная характеристика подсолнечной лузги – потенциального сырья для получения целлюлозы 272
45. Н. С. Никитенко, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер. Методы оптимизации люминесцентных антенн для атмосферных ультрафиолетовых телекоммуникаций 279
46. Л. В. Шастин, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер. О характеристиках атмосферных лазерных линий для систем мониторинга природных и антропогенных объектов 283
47. А. П. Золоторенко, В. П. Корольков, А. Р. Саметов, В. В. Черкашин. Коррекция микроструктуры скрещенных дифракционных решёток при термохимической лазерной записи 288

48. Д. Е. Капустина, В. П. Корольков, Р. И. Куц, А. Р. Саметов, С. К. Голубцов. Особенности применения полутоновых хромовых фотошаблонов для формирования микрорельефа многоуровневых дифракционных элементов 297
49. Ю. Ц. Батомункуев. Особенности ахроматизации дифракционных оптических систем 301
50. Ю. Ц. Батомункуев. Применение объемных голограммных оптических элементов. Часть 4 304
51. В. И. Наливайко, М. А. Пономарева, Ю. Ц. Батомункуев. Формирование кольцевого изображения с помощью пленочного аксикона с предельно большим фокусным расстоянием 308
52. Ю. Ц. Батомункуев, В. И. Наливайко. Расчет аберраций дифракционного аксикона 313
53. С. Н. Былин, В. В. Лубский. Применение дифракционного элемента в качестве разветвителя в оптической модели связи 318
54. В. С. Крылов. Информационно-измерительная система термостатирования помещений для лабораторий геометрических измерений 325
55. В. С. Крылов, И. Д. Карпов. Анализ стабильности аналоговых сигналов силы тока и переменного напряжения, а также фиктивной мощности в устройстве генерации испытательных воздействий 330
56. Г. В. Симонова, А.П. Кириченко. Оценка эффективности очистки зерновых культур от пестицидов 336
57. В. М. Тиссен, В. Д. Рачков. Построение моделей изменений бортовых шкал времени ГЛОНАСС и GPS по данным частотно-временных поправок 342
58. Е. В. Рыжкова, А. В. Шабурова. Введение электронной фиксации данных при проведении контроля качества наукоемкой продукции 351
59. М. С. Приморский, А. В. Шабурова. Совершенствование системы управления проектами на основе стандартов ISO 357
60. И. В. Борисова, Н. Д. Герасимова. Итерационная фильтрация для восстановления размытых изображений 364
61. А. Н. Ларионов. Комплексные решения для аддитивных производств. Проектирование и анализ прочности деталей, моделирование процесса 3D-печати 372
62. Е. В. Проскуряков, А. Е. Фарахова, М. А. Анисова. Вопросы баллистики гранат 377
63. А. Е. Фарахова, И. Б. Палымский. Теоретическая оценка наибольшей суммарной энергии осколков при взрыве боеприпаса осколочного действия 383

CONTENTS

1. M. E. Arapova, E. Yu. Kutenkova. Photonic crystals in optical instrumentation 3
2. A. M. Bakhtiyarova, V. R. Kostyleva, M. S, Ismailova, T. V. Larina. From Earth to the stars: new materials that overcome the limits of space technology 8
3. A. M. Bakhtiyarova, E. D. Moiseeva, D. V. Klimova, E. G. Bobyleva. Comparison of the technological process of lens production in single and serial production 14
4. S. M. Danilov, E. G. Bobyleva, I. V. Parko. Smart-Window technology 21
5. V. R. Kostyleva, A. M. Bakhtiyarova, M. S. Ismailova, I. V. Parko. Revealing the secrets of the Universe: astrophotography for the detection and study of space objects 25
6. V. R. Kostyleva, A. M. Bakhtiyarova, M. S. Ismailova, I. V. Parko. A new era of Russian space construction: prospects for the development of the space fleet 32
7. V. R. Kostyleva, V. V. Ilyin, I. V. Parko. Observing space in a new way: the advantages of smart telescopes 39
8. E. A. Lebedev, E. G. Bobilyova. Solving the triplex delamination problem 45
9. I. A. Vykhristyuk, S. D. Zhdanov, R. V. Kulikov, E. V. Sysoev. Study of the influence of scanning speed non-uniformity on the results of surface relief measurement by an interference profilometer 50
10. I. A. Vykhristyuk. Algorithm for controlling the appearance of cartridge cases using artificial neural networks 61
11. I. G. Palchikova, E. S. Smirnov. Lens with extended depth of focus 69
12. I. K. Kabardin, M. R. Gordienko, A. D. Rotar, V. G. Glavny. Application of the salt label method to study multiphase hydrodynamics 79
13. I. K. Kabardin, A. D. Rotar, V. G. Meledin, K. S. Zubanov. Study of velocity distribution from vitoshinsky nozzle by laser doppler anemometry method 88
14. M. R. Gordienko, I. K. Kabardin, P. D. Lobanov, I. A. Evdokimenko. Study of gas bubble ascent using optical and electrical impedance methods 96
15. M. R. Gordienko, I. K. Kabardin, N. A. Pribaturin, V. G. Meledin. Diagnostics of ascent of a gas bubble simulator by optical and electro-impedance methods 100
16. S. V. Kakaulin, I. K. Kabardin. Investigation of properties of lighting sources with increasing time resolution of the phase triangulation method 104

17. S. V. Kakaulin, I. K. Kabardin. Evaluation of the stability of image registration with variations in the time resolution of sources and receivers using the phase triangulation method 109
18. K. S. Zubanov, I. K. Kabardin, S. V. Dvoynishnikov, V. G. Meledin. Simple single-frequency differential optical LDA..... 114
19. K. S. Zubanov, I. K. Kabardin, V. V. Rakhmanov, A. M. Oborin. Optimization of the optical circuit of the differential optical LDA 121
20. M. V. Kashkarova, D. V. Litvinova, A. Yu. Kravtsova. Digital twin of viscous liquid flow in a t-mixer at different flow rates in the input channels 128
21. M. V. Kashkarova, A. Yu. Kravtsova. Visualization of λ_2-isosurfaces of viscous liquid in t-microchannels with superimposed pulsations..... 133
22. V. V. Rakhmanov, S. K. Kachurin, V. G. Meledin, G. V. Bakakin. Investigation of the temperature dependence of the gain coefficient of mcropixel avalanche photodetectors 138
23. V. V. Rakhmanov, V. G. Meledin, G. V. Bakakin, V. G. Glavny. Method for testing the amplitude-frequency characteristics of photomultiplier tubes 146
24. V. O. Zuev, S. V. Dvoynishnikov, V. G. Meledin, V. A. Pavlov. Phase triangulation method with receiving-transmitting function adaptive correction..... 153
25. V. O. Zuev, S. V. Dvoynishnikov, G. V. Bakakin, V. A. Pavlov. Adaptive to surface optical properties three-dimensional deformations triangulation control 161
26. S. V. Dvoynishnikov, V. V. Rakhmanov, V. O. Zuev, G. V. Bakakin. Hardware and software architecture of the optical system of quality control for fuel pellets..... 168
27. S. V. Dvoynishnikov, V. V. Rakhmanov, V. A. Pavlov, V. O. Zuev. Method of control of defects of the side and end surfaces of fuel pellets 174
28. A. M. Oborin, K. S. Zubanov, S. V. Dvoinishnikov. Development of a laser doppler anemometer software without frequency shift..... 178
29. I. A. Evdokimenko, D. E. Legostaev, K. A. Filippskii. Features of the outflow of a gas bubble through a horizontal bundle of pipes in a fixed volume of liquid 186
30. S. M. Volkov, N. A. Gulyaev, D. E. Legostaev, K. A. Filipskiy. Dynamics of gas bubbles in an annular channel of small cross section 192
31. P. D. Lobanov, A. I. Svetonosov, N. A. Pribaturin. Visualization of bubble motion in liquid metal..... 197
32. N. A. Gulyaev, A. I. Svetonosov, I. A. Evdokimenko, D. E. Legostaev, K. A. Filipskiy. Experimental study of bubble motion in a vertical beam of rods... 203
33. A. A. Syrbakov, I. A. Zarubin, A. A. Dzuba, S. V. Dodonov. Agreement of parameters of the echelle-grating with dimensions of photodetector array 208
34. I. A. Evdokimenko, D. E. Legostaev, K. A. Filippskii. The movement of bubbles in a downward flow through a bunch of horizontal tubes..... 214

35. A. V. Chinak. Clustering of monodisperse bubbles in an inclined tube..... 218
36. M. A. Vorobyev, A. O. Karhov. Application of the BOS technique for measuring density stratification in a water-salt solution..... 223
37. M. A. Vorobyev, A. O. Karhov. Effect of surfactants on bubble rise velocities in an inclined channel 229
38. M. V. Kashkarova, S. V. Kakaulin, K. S. Zubanov, A. Yu. Kravtsova. Digital visualization of the cavitation flow of a hydrofoil in a slit channel 234
39. A. A. Guseinov, D. V. Litvinova, A. Y. Kravtsova. Alignment of the particle image velocimetry equipment for investigations of the fluid flows in microchannels with bluff body..... 238
40. E. V. Ryzhkova, D. N. Titov. Application of AI in the Internet of things..... 242
41. A. A. Kiselev, V. M. Belov. Methodology for assessing the security level of critical information infrastructure facilities using fuzzy logic..... 246
42. M. B. Abilev, D. Yerbolat, A. V. Troeglazova. Photoluminescent properties of zirconium dioxide 253
43. N. V. Prohorenkova, A. M. Zhilkashinova, A. V. Troeglazova. Vacuum technologies for applying radio-absorbing coatings 261
44. A. A. Imasheva, K. Akatan, A. V. Troeglazova, S. K. Kabdrakhmanova. Qualitative characteristics of sunflower husks – potential raw material for obtaining cellulose..... 272
45. N. S. Nikitenko, A. V. Britvin, B. V. Poller. Methods of optimization of luminescent antennas for use in atmospheric ultraviolet telecommunications.... 279
46. L. V. Shastin, A. V. Britvin, B. V. Poller. Characteristics of atmospheric laser lines for monitoring systems of natural and anthropogenic objects..... 283
47. A. P. Zolotorenko, V. P. Korolkov, A. R. Sametov, V. V. Cherkashin. Correction of the microstructure of crossed diffraction gratings during thermochemical laser recording 288
48. D. E. Kapustina, V. P. Korolkov, R. I. Kuts, A. R. Sametov, S. K. Golubtsov. Features of the application of halftone chrome photomasks for the formation of microrelief of multilevel diffraction elements 297
49. Yu. Ts. Batomunkuev. Features of achromatization of diffractive optical systems..... 301
50. Yu. Ts. Batomunkuev. Application of volume hologram optical elements. Part 4 304
51. V. I. Nalivaiko, M. A. Ponomareva, Yu. Ts. Batomunkuev. Formation of ring image using film axicon with extremely long focal length..... 308
52. Y. T. Batomunkuev, V. I. Nalivaiko. Calculation of aberrations of the diffraction axicon 313
53. S. N. Bylin, V. V. Lubsky. Application of a diffractive element as a splitter in an optical communication model..... 318
54. V. S. Krylov. Information and measuring system for room temperature control for geometric measurements laboratory 325

55. V. S. Krylov, I. D. Karpov. Analysis of stability of analog current and alternating voltage signals, as well as apparent power in a test signal generation device 330
56. G. V. Simonova, A. P. Kirichenko. Evaluation of the efficiency of cleaning grain crops from pesticides 336
57. V. M. Tissen, V. D. Rachkov. Developing models of changes in the on-board GLONASS and GPS time scales based on the data of time-frequency corrections 342
58. E. V. Ryzhkova, A. V. Shaburova. Introduction of electronic data recording during quality control of high-tech products 351
59. M. S. Primorskiy, A.V. Shaburova. Improving the project management system based on ISO standards 357
60. I. V. Borisova, N. D. Gerasimova. Iterative Filtering for Restoring Blurred Images 364
61. A. N. Larionov. Comprehensive Solutions for Additive Manufacturing. Designing and Analyzing the Strength of Parts, Modeling the 3D Printing Process 372
62. E. V. Proskuryakov, A. E. Farakhova, M. A. Anisova. Issues of Grenade Ballistics 377
63. A. E. Farakhova, I. B. Palymskiy. Theoretical estimation of the highest total energy of fragments during the explosion of a fragmentation munition 383

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXI Международный научный конгресс

Сборник материалов в 8 т.

Т. 8
Международная научная конференция

«СИБОПТИКА-2025. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ»

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Я. А. Лесных*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 13.10.2025. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 23,01. Тираж 34 экз. Заказ 132.
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.