Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 8
Международная научная конференция

«СИБОПТИКА-2026. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ»

№ 1

Новосибирск
СГУГиТ
2026

УДК 528
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, декан ФИОиСС СГУГиТ, г. Новосибирск
А. В. Шабурова

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств и технологий СГУГиТ, г. Новосибирск
Д. С. Михайлова

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XXII Международный научный конгресс, 18–22 мая 2026 г., Новосибирск : сборник материалов в 9 т. Т. 8: Международная научная конференция «СибОптика-2026. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». – Новосибирск : СГУГиТ, 2026. № 1. – 207 с. – ISSN 2618-981X. – Текст : непосредственный.

DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1

В сборнике опубликованы материалы XXII 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, 2026

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК 535.3
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-3-6

Л. В. Шастин[1,2]✉

Перспективы использования фемтосекундных лазерных линий в атмосферных линиях телекоммуникаций и мониторинга

[1]Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Министерство науки и инновационной политики Новосибирской области, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: leonid_shastin@mail.ru

Аннотация. В настоящее время лазерное излучение как средство передачи информации используется повсеместно от простейших бытовых целей до космического сообщения. В том числе и в атмосферных линиях телекоммуникаций и мониторинга природных и антропогенных объектов. Поэтому совершенно естественно встает вопрос об увеличении эффективности передачи информации в подобных лазерных линиях связи. Одним из перспективных направлений исследований в данной области является использование фемтосекундного лазерного излучения, ввиду его уникальных свойств. В данной статье теоретически оценены перспективы использования фемтосекундного излучения для использования в атмосферных линиях телекоммуникаций и мониторинга, и рассчитаны возможные характеристики таких линий.

Ключевые слова: фемтосекундные системы телекоммуникации, атмосферная оптическая лазерная связь, системы мониторинга

L. V. Shastin[1,2]✉

Prospects for the use of femtosecond laser lines in atmospheric telecommunication and monitoring lines

[1]Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: leonid_shastin@mail.ru

Abstract. Currently, laser radiation is used everywhere, from simple household purposes to space communication, as a means of transmitting information. This includes atmospheric telecommunication lines and monitoring of natural and anthropogenic objects. Therefore, it is only natural to consider ways to increase the efficiency of information transmission in such laser communication lines. One promising area of research in this field is the use of femtosecond laser radiation due to its unique properties. This article theoretically evaluates the prospects of using femtosecond radiation for use in atmospheric telecommunications and monitoring lines, and calculates the possible characteristics of such lines.

Keywords: femtosecond telecommunication systems, atmospheric optical laser communication, monitoring system

Введение

В современном мире для комфортной и безопасной жизни человечеству необходимо проводить непрерывный мониторинг различных природных и антропогенных объектов. Для обеспечения максимальной безопасности для человека при

таком мониторинге удобно использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Особо остро при осуществлении такого мониторинга встает вопрос качества обмена информацией с БПЛА. Проблема увеличения эффективности передачи информации никогда не потеряет своей актуальности. Ведь вместе с технологическим прогрессом появляются все новые способы передавать информацию, а также открываются возможности усовершенствования уже существующих способов. Одним из наиболее популярных и перспективных способов передачи информации на сегодняшний день является передача информации посредством лазерного излучения. Более того, в предыдущих работах было показано, что использование лазерного излучения является крайне перспективным для осуществления связи с БПЛА, производящим мониторинг природных и антропогенных объектов [1-3]. На данный момент большой интерес вызывает вопрос передачи информации на БПЛА с помощью фемтосекундного лазерного излучения в связи с его уникальными свойствами.

Как известно, передача данных с помощью лазерного излучения может осуществляться по закрытому каналу с помощью различных волноводов (волоконно-оптические линии связи или ВОЛС) или же по открытому каналу непосредственно по атмосфере (атмосферные оптические линии связи или же АОЛС). И фемтосекундные лазеры могут найти применение в обоих видах передачи информации.

Особенности распространения фемтосекундного излучения в атмосфере

В случае передачи информации с помощью АОЛС характеристики атмосферы, такие как, например, метеорологическая дальность видимости или турбулентность критически влияют на качество передаваемого сигнала. Логично, что в случае появления на пути следования лазерного луча, передающего сигнал, тумана или облака, качество прошедшего через них сигнала сильно упадет. Более того, сигнал может вообще не дойти до приемного устройства в связи с эффектами поглощения и рассеяния, происходящими при взаимодействии лазерного луча с облаком или туманом. Однако, использование фемтосекундного лазера может помочь решить данную проблему.

Как известно, при генерации фемтосекундного импульса и превышении критической мощности самофокусировки возникает явление филаментации. Подробный анализ критической мощности самофокусировки для различных видов пучка представлен в работе [4]. При возникновении филамента из-за локализации высокой мощности в его области образуется плазма. Образование плазмы генерирует акустическую волну вокруг филамента, которая разгоняет область облака или тумана с пути следования луча. При этом диаметр освобожденного таким образом канала значительно превышает диаметр самого филамента. Таким образом в освободившийся канал можно направить лазерный луч, содержащий информацию, соответственно качество сигнала и эффективность передачи сигнала должны сохраниться.

Если же рассмотреть идею передачи информации через атмосферу только лишь с помощью луча фемтосекундного лазера без отдельного луча – носителя информации, то можно увидеть следующую проблему. Так как филаментация –

нелинейный процесс, то информация, находящаяся в луче фемтосекундного лазера перед началом филамента, на протяжении филамента претерпевает значительные изменения и после выхода из филамента принимает совершенно другой вид. В частности, предложено интересное решение этой проблемы на основе использования нейронных сетей для расшифровки данных, полученных на выходе филамента. В ходе эксперимента эти нейронные сети были специально обучены на массивах исходных и полученных данных, что в итоге привело к стабильной и надежной интерпретации искаженных данных. Более того, такой тип связи автоматически является зашифрованным, так как без специально подготовленных для этой цели нейронных сетей злоумышленник не сможет расшифровать полученные данные. Как заявляют авторы, их трехсантиметровая кювета, наполненная этанолом, через которую проходит филамент, может считаться эквивалентной трехкилометровой атмосферной трассе.

Подробный анализ влияния турбулентности на различные характеристики филамента представлен в работах [4,5]. В результате анализа авторы сделали ряд важных выводов. Например, что с увеличением интенсивности турбулентности и расширением зоны ее воздействия точка начала филамента смещается в сторону распространения луча, таким образом делая его короче. Во-вторых, что при превышении структурной постоянной турбулентности показателя преломления определенного значения вместо одного филамента возникает несколько. Фемтосекундный лазер успешно использован для измерения дальности при использовании стандарта частоты [6].

Учитывая, что излучение Солнца в области дальнего ультрафиолета практически полностью поглощается атмосферой, использование фемтосекундного лазера в ультрафиолетовой области в качестве передатчика является достаточно перспективным. Вообще, филаментация излучения УФ диапазона изучена заметно слабее в сравнении с ИК диапазоном. Однако, результаты экспериментов говорят, что по сравнению с ИК диапазоном протяженность УФ филамента больше, а диаметр плазменного канала меньше.

Возможные характеристики атмосферных линий с фемтосекундными линиями связи

По итогу теоретических оценок [1-3] можно сделать вывод, что рассматриваемый УФ фемтосекундный лазер вполне подходит для реализации канала связи с БПЛА, осуществляющим мониторинг природных и антропогенных объектов, так как даже при плохих погодных условиях значения облученности на разных расстояниях остаются достаточными для регистрации сигнала.

Выводы

В рамках данной работы, были рассмотрены современные исследования в области передачи информации с помощью фемтосекундного лазерного излучения. Также были проведены оценки возможных характеристик атмосферных линий с фемтосекундными линиями связи, которые показали пригодность рассматриваемого излучателя для потенциального использования в рассматриваемой линии связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шастин Л. В. О построении ультрафиолетовой линии связи и ориентации для управления малым беспилотным летательным аппаратом / Л. В. Шастин, Н. В. Шахов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 8, № 2. – С. 161–166. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-8-2-161-166. – EDN LHQEZJ.

2. Шастин Л. В. Характеристики волоконных сумматоров УФ излучений для УФ линий связи и ориентации БПЛА / Л. В. Шастин, А. В. Бритвин, Б. В. Поллер // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 29–34. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-8-1-29-34. – EDN FEVAWX.

3. Поллер Б.В. Перспективы развития лазерных информационных систем с волоконными и фемтосекундными лазерами. // Тр. конф. «Современные проблемы геодезии и оптики». – Изд-во СГГА. – Новосибирск. – 2003 г. – С.148–150.

4. Козлов С.А. Основы фемтосекундной оптики. – Физматлит. – 2009 г. – 292 с.

5. Фемтосекундная атмосферная оптика. под ред. С.Н. Багаева, Г.Г. Матвиенко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2010 г. – 238 с.

6. Соколов Д. А. Абсолютный дальномер на основе фемтосекундного лазера с возможностью прослеживаемости к эталону времени и частоты / Д. А. Соколов, С. А. Козаченков // Оптический журнал. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 25–37. – DOI 10.17586/1023-5086-2023-90-06-25-37. – EDN IPBEXF.

© Л. В. Шастин, 2026

УДК 535.3: 535.241.1:534.537:535.42
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-7-13

А. Г. Седухин[1]✉, М. С. Колташова[2]

Оптические системы на основе аксиконных и линзовых элементов и улучшение их характеристик при формировании перестраиваемых кольцевых лазерных пучков

[1]Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Аннотация. Предложена и численно исследована афокальная оптическая система на основе двух последовательно расположенных телескопов из положительных аксиконных и линзовых рефракционных элементов, а также осесимметричной апертурной диафрагмы, блокирующей центральную и периферийную части входного пучка. Данная система служит для преобразования коллимированного лазерного пучка с гауссовой формой распределения интенсивности в коллимированный пучок с распределением интенсивности в форме кольца с заданным радиусом и шириной, а также с быстрым спадом интенсивности в периферийных частях кольца. Размер пространственных зон спада интенсивности можно изменять путем изменения числовой апертуры указанных телескопов. При этом, не изменяя аксиконные элементы и первый линзовый элемент, радиус и ширину кольца выходного распределения интенсивности можно изменять путем согласованной подстройки поперечного размера гауссова входного пучка, размера окна диафрагмы, а также фокусного расстояния последнего линзового элемента. Одним из применений рассматриваемой оптической системы являются системы фокусировки излучения в установках прямой лазерной записи, ориентированные на повышенное перестраиваемое пространственное разрешение и имеющие неизменный входной зрачок. Рассмотрен частный пример расчета предложенной системы для типового случая, приведено численное моделирование ее характеристик с учетом дифракции света на апертурах оптических элементов. Указаны меры, способствующие улучшению формы распределения интенсивности в формируемом кольце.

Ключевые слова: коллимированные лазерные пучки, гауссовы пучки, кольцевые пучки, дифракция света

A. G. Sedukhin[1]✉, M. S. Koltashova[2]

Optical systems based on axicon and lens elements and improvement of their characteristics in forming tunable annular laser beams

[1]Institute of Automation and Electrometry, SB RAS, Russian Federation, Novosibirsk
[2]Novosibirsk State Technical University, Russian Federation, Novosibirsk
e-mail: sedukhin@iae.nsk.su

Abstract. An afocal optical system based on two successively arranged telescopes consisting of positive axicon and lens refractive elements, as well as an axisymmetric aperture stop blocking the central and peripheral portions of the incident beam is proposed and numerically investigated. This system is used to transform a collimated laser beam with a Gaussian intensity distribution into a collimated beam with an annular intensity distribution of a given radius and width, as well as with a rapid intensity decay in the marginal portions of the annulus. The size of the spatial intensity decay zones can

be varied by changing the numerical aperture of these telescopes. Moreover, without changing the axicon elements and the first lens element, the radius and width of the output annular intensity distribution can be varied by matched adjustment of the transverse dimension of the Gaussian input beam, the size of the annular opening, and the focal length of the last lens element. One application of the optical system under consideration is focusing systems for direct laser writing systems, designed for increased tunable spatial resolution and having a fixed entrance pupil. A particular example of calculating the proposed system for a typical case is considered, and a numerical simulation of its characteristics is given taking into account the diffraction of light on the apertures of optical elements. The ways for improving the intensity distribution in the formed annulus are outlined.

Keywords: collimated laser beams, Gaussian beams, annular beams, light diffraction

Введение

Решение задачи по острой и светоэффективной фокусировке лазерных пучков является актуальной во множестве приложений, например, таких, как биологическая микроскопия [1,2], оптический захват микро- и наночастиц [3,4], прямая лазерная запись микро- и наноструктур на плоских подложках [5], а также трехмерная печать с помощью лазерных принтеров [6]. Основными факторами, способствующими реализации острой осесимметричной фокусировки лазерного пучка и сокращению площади его поперечного размера в дальней фокальной плоскости в свободном пространстве являются, как известно, уменьшение рабочей длины волны лазерного пучка, увеличение числовой апертуры фокусирующей оптики, использование неоднородных видов поляризации лазерного излучения, применение пространственной фазовой фильтрации амплитуды пучка (как в радиальном, так и в азимутальном направлениях), а также использование кольцевого амплитудного профиля фокусируемого пучка. Последний фактор эквивалентен экранированию центральной части пучка в плоскости входного зрачка фокусирующей оптической системы или, в другой терминологии, блокировке низких пространственных частот пучка. Особенно важным является учет данного фактора при использовании неоднородных цилиндрических видов поляризации пучка – радиальной и азимутальной [7, 8]. В простейшим варианте, экранирование пучка осуществляют с помощью соответствующей апертурной диафрагмы. Однако, при необходимости блокировки значительной по площади центральной части стандартного лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности в поперечной плоскости существенно падает световая эффективность системы фокусировки, а также большую роль начинает играть дифракция на краю указанной диафрагмы, что приводит к возрастанию амплитуды паразитных максимумов интенсивности в сфокусированном пятне. Уменьшить указанные дифракционные эффекты можно с помощью сглаживания резких границ диафрагм, что эквивалентно так называемой амплитудной аподизации пучка. Однако, такая аподизация усложняет вид и технологию изготовления диафрагмы, а также не обеспечивает повышения общей световой эффективности системы фокусировки. Замена указанной диафрагмы на известные более светоэффективные оптические системы формирования кольцевого распределения интенсивности лазерных пучков на основе рефракционных аксиконов [9] требует

использования дополнительной оптики и кольцевых фильтров пространственных частот, которые блокируют паразитные пространственные частоты плосковолновых компонентов лазерного пучка, исходящих из нерабочей области вблизи вершин аксиконов. Также, последние системы могут не обеспечить согласование размера формируемого кольцевого распределения интенсивности на своем выходе и размера входного зрачка фокусирующей оптики.

В настоящей работе предлагается и исследуется афокальная оптическая система формирования кольцевого распределения интенсивности лазерного пучка, в которой устраняются вышеперечисленные недостатки, и которая ориентирована на ее использование с гауссовой формой интенсивности входного пучка и на использование в составе более общей системы острой фокусировки. Эскиз данной системы в меридиональном сечении показан на рис. 1. Она состоит из последовательно расположенных центральной диафрагмы S, двух встречно расположенных положительных рефракционных аксиконов A_1 и A_2, а также двух положительных линзовых объективов L_1 и L_2, образующих телескопическую систему для уменьшения поперечного размера кольцевого пучка и его согласования со входным зрачком острофокусирующей системы (которая на рис. 1 не показана). Синими линиями со стрелками показан ход лучей в данной системе, а линиями, состоящими из точек, – ход лучей, начиная с приосевой области для случая идеальных акиконов с острыми вершинами. Черными вертикальными линиями показаны оси по радиальной координате для различных поперечных плоскостей. Жирными линиями сиреневого цвета выделены нерабочие центральные (при вершинах) и периферийные области на конических поверхностях реальных коммерческих аксиконов – данные области имеют существенные отклонения от идеальных конических поверхностей, вызванные особенностями технологии изготовления аксиконов.

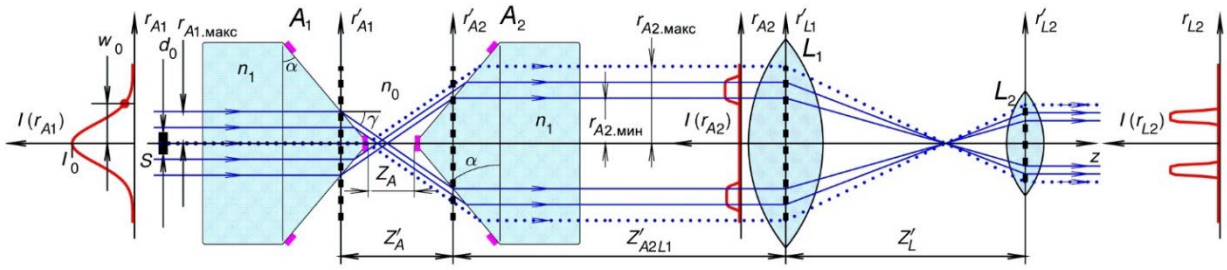


Рис. 1. Афокальная оптическая система для формирования коллимированного лазерного пучка с перестраиваемым кольцевым распределением интенсивности

И зменяя основные параметры оптических элементов данной системы, можно в широких пределах изменять параметры формируемого кольцевого распределения интенсивности в выходной плоскости. Вместе с тем, использование центральной диафрагмы S малого размера (по сравнению с радиусом шейки освещающего гауссова пучка w_0) и внешней апертурной диафрагмы, экрани-

рующей периферийные пучки лучей (также в плоскости диафрагмы *S*, но на рис. 1 не отображенной для ясности чертежа) приводит к некоторым дифракционным эффектам. Но, как можно ожидать, такие эффекты должны быть заметно меньшими, чем при усечении гауссова пучка диафрагмами в его центральной либо периферийной частях. Кроме того, степень ослабления дифракционных эффектов можно повысить, уменьшив числовую апертуру выходного каскада системы в виде афокального рефракционно-линзового телескопа.

Для проверки характеристик данной системы, было проведено численное моделирование ее характеристик для ряда случав использования высокоапертурных оптических элементов с различными параметрами и скалярной формы освещающего гауссова пучка. С целью упрощения расчетов, толстые оптические элементы – аксиконы и линзовые объективы – были заменены на эквивалентные тонкие элементы, обеспечивающие для лучей на любом радиусе в рабочих зонах точно такую же фазовую задержку световых лучей, как и толстые элементы. При расчетах использовалась скалярная теория дифракции Рэлея-Зоммерфельда [10]. На рис. 1 положения плоскостей тонких аксиконов A_1 и A_2 отмечены в виде координатных осей r'_{A1} и r'_{A2}, а для тонких линзовых объективов – в виде координатных осей r'_{L1} и r'_{L2}. Сами тонкие аксиконы и линзы показаны на указанных осях жирными пунктирными линиями. Функции пропускания тонких аксиконов A_1 и A_2 принимались равными, соответственно, $\exp\left[-i\left(2\pi r'_{A1}\sin\gamma\right)/\lambda\right]$ и $\exp\left[-i\left(2\pi r'_{A2}\sin\gamma\right)/\lambda\right]$, а тонких линзовых объективов L_1 и L_2 – $\exp\left(-i2\pi\sqrt{r'^2_{L1}+f_1^2}\,/\lambda\right)$ и $\exp\left(-i2\pi\sqrt{r'^2_{L2}+f_2^2}\,/\lambda\right)$, где λ – длина волны лазерного излучения; f_1 и f_2 – фокусные расстояния линзовых объективов L_1 и L_2; $\gamma=\arcsin\left[\left(n_1/n_0\right)\sin\alpha\right]-\alpha$ – угол отклонения коллимированных лучей аксиконом A_1; α – угол при вершинах аксиконов A_1 и A_2; n_1 и n_0 – соответственно, показатели преломления материала аксиконов и свободного пространства между ними. Для иллюстрации расчетных характеристик приведем один частный пример моделирования, в котором были подобраны взаимно согласованные исходные параметры оптической системы, обеспечивающие форму кольцевого распределения интенсивности на выходе с приближенно симметричной в радиальном направлении вершиной (относительно радиальной точки максимума интенсивности) и с приближенно одинаковыми величинами крайних боковых максимумов кольцевого распределения (внутреннего и внешнего). В данном примере, исходными параметрами формируемого кольцевого распределения интенсивности на выходе системы были наперед задаваемые внешний диаметр и ширина светового кольца, такие, что ширина кольца, в приближении геометрической оптики, равна половине радиуса внутреннего размера самого кольца. Конкретные параметры следующие: λ = 633 нм, n_1 = 1,457 (кварцевое стекло), n_0=1 (воздушная среда), угол при вершине аксиконов α = 40° (соответствующий угол отклонения лучей аксиконами γ =

34,58°), диаметр центральной диафрагмы S (экранирующей внутренние нерабочие зоны аксиконов при их вершинах) $d_0 = 2r_{A1.\text{мин}} = 1{,}5$ мм, минимальный радиус рабочей зоны аксикона A_1 (в приближении геометрической оптики) $r_{A1.\text{мин}} = d_0/2 = 0{,}75$ мм, максимальный радиус рабочей зоны аксикона A_1 $r_{A1.\text{макс}} = 2{,}417$ мм, радиус входного гауссова пучка $w_0 = 1{,}08$ $r_{A1.\text{макс}} = 2{,}610$ мм, расстояние между плоскостями тонких аксиконов $Z'_A = 10{,}172$ мм (соответствующее расстояние между геометрически восстановленными вершинами аксиконов $Z_A = 5{,}347$ мм), максимальный и минимальный радиус рабочей зоны аксикона A_2 $r_{A2.\text{мин}} = 3{,}333$ мм и $r_{A2.\text{макс}} = 5{,}0$ мм, коэффициент редукции линзового телескопа $M = 0{,}5$, фокусные расстояния линзовых объективов L_1 и L_2 $f_1 = 14{,}666$ мм и $f_2 = f_1 \times M = 7{,}333$ мм, максимальный и минимальный радиус формируемого кольца на выходе линзы L_2 $r_{L2.\text{мин}} = 1{,}667$ мм и $r_{L2.\text{макс}} = 2{,}5$ мм, радиальная ширина кольца $\Delta r_{L2} = r_{L2.\text{макс}} - r_{L2.\text{мин}} = 2r_{L2.\text{мин}} = 0{,}833$.

Используя указанные параметры и стандартную процедуру расчета, основанную на теории дифракции Рэлея-Зоммерфельда, сначала находилась комплексная амплитуда поля за аксиконом A_1 (с учетом вышеуказанной функции его пропускания), затем рассчитывалось поле при распространении света от апертуры тонкого аксикона A_1 до апертуры тонкого аксикона A_2, найденное поле помножалось на функции пропускания аксикона A_2 и линзового объектива L_1, и далее находилось поле на выходе объектива L_2, на расстоянии $f_1 + f_2 = 22$ мм от L_1. Расстояние между аксиконом A_2 и линзовым объективом L_1, где световые лучи параллельны оптической оси z, принималось при расчете малым в сравнении с поперечными размерами оптических элементов и не учитывалось. Результирующие распределения интенсивности в характерных поперечных плоскостях представлены на рис. 2.

Результаты и заключение

Как можно видеть, переходные радиальные границы рассчитанных распределений интенсивности достаточно хорошо совпали с исходными радиальными границами, заданными геометрически. Кроме того, как следует из графиков рис. 1, исследованная система достаточно хорошо преобразовала входное частично-усеченное (на периферии и в центре) гауссово распределение интенсивности в широкое кольцевое распределение с шириной участков быстрого спада интенсивности (по уровням 0,1 и 0,9 от уровня интенсивности в центре кольца) порядка 0,07 мм, что соответствует приближенно 1/12 части ширины кольца. Форма кольца получилась близкой к прямоугольной. С учетом высокочастотных осцилляций интенсивности, в пределах ширины кольца интенсивность изменяется приближенно на ±24%, а без учета осцилляций – приближенно втрое меньше, ±7,5%. Эти данные можно сравнить с вариацией интенсивности исходного гауссова распределения в радиальных точках центрального и периферийного усечения (от уровня 0,84 до 0,19), соответствующей приближенно ±63%.

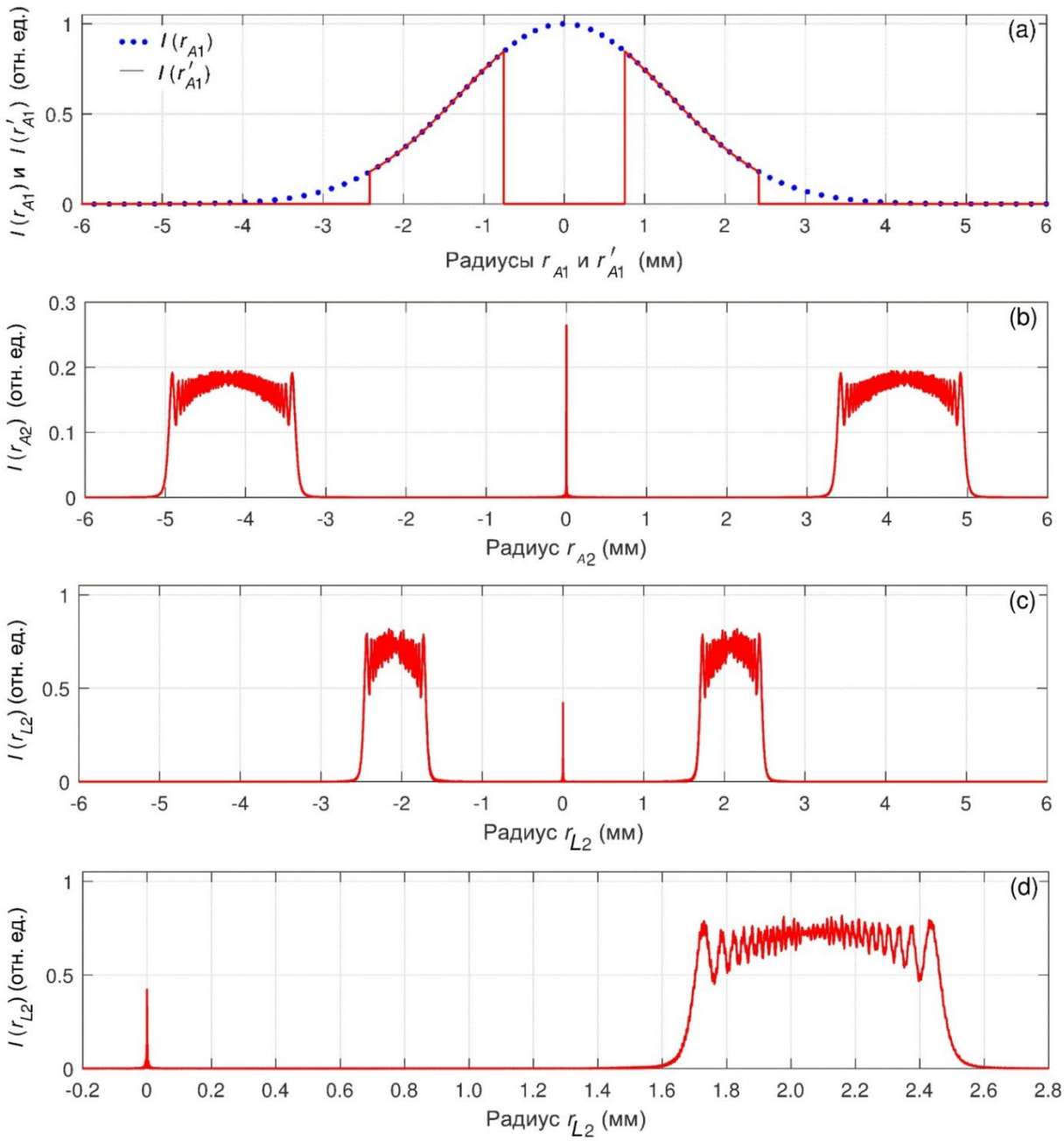


Рис. 2. Теоретические распределения радиальной интенсивности в поперечных плоскостях $(0,r_{A1})$ и $(0,r'_{A1})$ (a), $(0,r_{A2})$ (b), $(0,r_{L2})$ в расширенном диапазоне (c) и $(0,r_{L2})$ в более узком диапазоне (d) для системы на рис. 1 и частного примера с характеристиками и параметрами системы, указанными в тексте

Амплитуда незначительного по радиальной ширине центрального паразитного пика выходной интенсивности составляет приближенно 60% от средней интенсивности в кольце. Одной из мер уменьшения вариаций интенсивности в формируемом кольце является сужение радиальной ширины кольца. Для снижения высокочастотных осцилляций интенсивности в кольце могут быть использованы

методы амплитудной аподизации гауссова пучка вблизи внутреннего и внешнего радиуса его усечения.

Таким образом, в рассмотренном примере, вариация усредненной выходной интенсивности уменьшается по отношению к усеченной вариации гауссовой интенсивности более чем в 8 раз. Наряду с указанным относительно быстрым спадом интенсивности в периферийных частях кольца, это можно считать достаточно хорошим результатом, пригодным для дальнейшего использования исследованной оптической системы совместно с высокоапертурным объективом для реализации малого субдифракционного размера фокусируемого светового пятна.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания (гос. регистрационный № 124041700107-9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sheppard C.J.R., The Development of Microscopy for Super-Resolution: Confocal Microscopy, and Image Scanning Microscopy, Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11. – P. 8981.

2. Luo M., Sun D., Yang Y., Liu S., Wub J., Maa Z., Sun S., Sun X., Three-dimensional isotropic STED microscopy generated by 4π focusing of a radially polarized vortex Laguerre-Gaussian beam, Opt. Commun. 2020. – Vol. 463. – P. 125434.

3. Moradi H., Jabbarpour M., Abdollahpour D., and Hajizadeh F., 3D optical trapping by a tightly focused circular Airy beam, Opt. Lett., 2022. – Vol. 47. – P. 4115–4118.

4. Yang Y., Ren Y.-X., Chen M., Arita Y., and Rosales-Guzmán C., Optical trapping with structured light: a review, Adv. Photon. 2021. – Vol. 3. – P. 034001.

5. Coelho S., Baek J., Walsh J., Gooding J.J., and Gaus K., Direct laser writing for subnanometer focusing and single-molecule imaging, Nature Commun. 2022. – Vol. 13. – P. 647.

6. Sieber I., Thelen R., and Gengenbach U., Assessment of high-resolution 3D printed optics for the use case of rotation optics, Opt. Express 2020. – Vol. 28 (9). – P. 13423–13431.

7. Zhan Q., Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications, Adv. Opt. Photonics 2009. – Vol. 1(1). – P. 1–57.

8. Lerman G. M. and Levy U., Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions, Opt. Express 2008, – Vol. 16(7). – P. 4567-4581.

9. Xu X., Tang X., An H., Song H., Wang S., Kong L., High quality diameter-variable hollow annular beam generated by two round-tip axicons, Opt. Commun. 2025. – Vol. 578. –P. 131486 (1–8).

10. Ochoa N. A., Alternative approach to evaluate the Rayleigh-Sommerfeld diffraction integrals using tilted spherical waves, Opt. Express 2017. – Vol. 25(10). –P. 12008–12019.

© А. Г. Седухин, М. С. Колташева, 2026

УДК 535.4
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-14-19

В. Е. Зайцева[1,2], В. П. Корольков[1]✉

О возможности создания многослойных дифракционных аттенюаторов

[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. Рассмотрен подход к созданию дифракционных аттенюаторов для длины волны 1064 нм на основе формирования бинарного микрорельефа в многослойных диэлектрических покрытиях с остановкой реактивного ионного травления на стоп-слое. Предложена и промоделирована структура из нижней двухслойной структуры Al_2O_3/Ta_2O_5 и гибридного верхнего слоя из Ta_2O_5 и SiO_2, обеспечивающего эффективный показатель преломления, близкий к показателю стекла BK7. Показано, что такой подход позволяет минимизировать коэффициент отражения, повысить воспроизводимость фазового сдвига дифракционной структуры аттенюатора в гибридном слое и его дифракционную эффективность. Приведены результаты моделирования спектральных характеристик. Отмечена перспектива использования метода для изготовления фазовых аттенюаторов с псевдослучайной дифракционной структурой.

Ключевые слова: дифракционные аттенюаторы, многослойные покрытия, реактивное ионное травление, компьютерно-синтезированные голограммы

V. E. Zaitseva[1,2], V. P. Korolkov[1]✉

Possibility of creating multilayer diffraction attenuators

[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. An approach to the creation of diffraction attenuators for wavelength of 1064 nm based on the formation of a binary microrelief in multilayer dielectric coatings with a stop of reactive ion etching on the stop layer is considered. A structure consisting of bottom Al_2O_3/Ta_2O_5 bilayer and a hybrid top layer of Ta_2O_5 and SiO_2 is proposed and modeled, providing an effective refractive index close to that of BK7 glass. It is shown that this approach makes it possible to minimize the reflection coefficient, increase the reproducibility of the phase shift and the diffraction efficiency of diffraction attenuators. The results of modeling spectral characteristics are presented. The prospect of using the method for manufacturing phase attenuators of random pinholes is proposed.

Keywords: diffraction attenuators, multilayer coatings, reactive ion etching, computer-synthesized holograms

Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой альтернативу традиционной оптике: они удешевляют изготовление приборов и расширяют их возможности. Среди многообразия ДОЭ особое место занимают эле-

менты, работающие в нулевом порядке дифракции. В отличие от классических ДОЭ, использующих первый или более высокие порядки, нулевой порядок распространяется без углового отклонения и не имеет принципиальных ограничений по дифракционной эффективности, что сближает его с обычными оптическими элементами [1, 2].

Важным классом ДОЭ, работающих в нулевом порядке дифракции, являются дифракционные аттенюаторы (ДА) с плавным или ступенчатым изменением пропускания, в зависимости от места прохождения лазерного пучка через ДА [3].

Для ослабления лазерного пучка также применяют аттенюаторы на основе поглощающего покрытия переменной толщины [4,5] и поляризационные аттенюаторы (например, на основе двух скрещенных призм Глана – Тейлора [6]). Аттенюаторы с поглощающим покрытием не смещают пучок, но вызывают нагрев материала. Поляризационные аттенюаторы позволяют плавно регулировать пропускание, однако изменяют направление выходного пучка. Поэтому актуальной альтернативой являются дифракционные аттенюаторы (ДА), работающие в нулевом порядке дифракции: они не отклоняют пучок и перераспределяют энергию по порядкам, минимизируя тепловыделение.

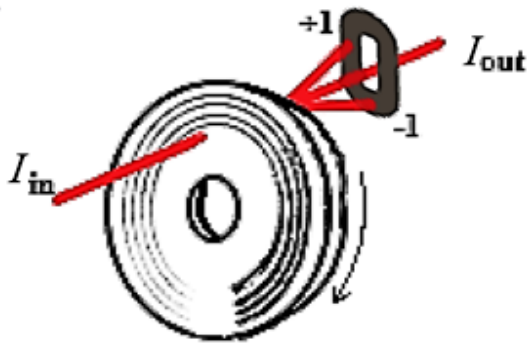


Рис.1. Принцип работы дифракционного аттенюатора

Обычно ДА изготавливают прямым реактивным ионным травлением кварцевой подложки через хромовую маску, однако такой метод приводит к неравномерности глубины рельефа на больших площадях, что снижает воспроизводимость характеристик ДА и затрудняет их контроль [1]. Кроме этого, фазовая дифракционная структура отражает достаточно много света (4% для плавленого кварца) в силу отсутствия антиотражающего покрытия.

Альтернативный подход, разработанный для компьютерно-синтезированных голограмм [7], используемых для контроля асферической оптики, предлагает формировать фазовый микрорельеф не травлением подложки, а вытравливанием верхнего слоя многослойного покрытия до стоп-слоя [8], что обеспечивает необходимый сдвиг фазы, позволяет встраивать антиотражающие слои и упрощает контроль процесса травления за счет наличия стоп-слоя.

Цель работы – оценить применимость данного подхода к изготовлению дифракционных аттенюаторов, на примере длины волны 1064 нм, на которой работает большое количество мощных импульсных твердотельных лазеров.

Методы и экспериментальные результаты

Дифракционные аттенюаторы, как правило, представляют собой бинарные дифракционные микроструктуры, формируемые на поверхности кварцевой подложки. Типичные диаметры подложек могут превышать 100 мм, тогда как минимальные элементы структуры составляют менее 0,5 мкм. Изготовление таких элементов в большинстве случаев осуществляется методами прямой лазерной [9] или электронно-лучевой записи, что обусловлено высокими требованиями к точности позиционирования и воспроизводимости субмикронных элементов на больших площадях [1,2].

Ранее для создания фазовых компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) был предложен метод, основанный на формировании бинарного микрорельефа в многослойных диэлектрических покрытиях с остановкой реактивного ионного травления на внутреннем стоп-слое [7]. В рамках данного подхода была разработана и изготовлена пятислойная структура $SiO_2/HfO_2/SiO_2/Al_2O_3/HfO_2$, оптимизированная в расчете для ближнего ИК-диапазона. Расчет структуры выполнялся для длины волны 820 нм, однако экспериментальные спектральные характеристики полученного образца показали смещение минимума отражения до 850 нм. После травления верхних слоев средний коэффициент отражения структуры на длине волны 850 нм составил 2,1 %, а дифракционная эффективность в первом порядке достигла 33 %.

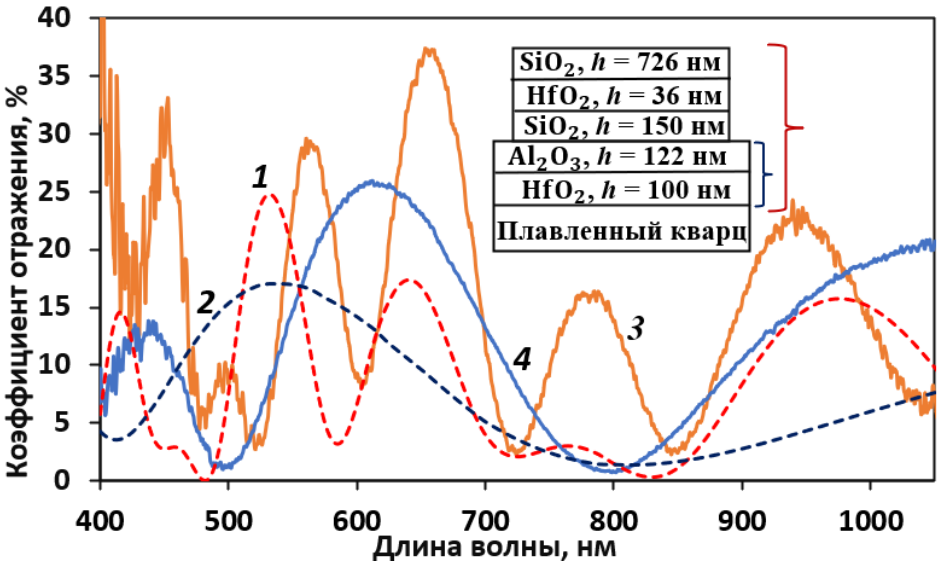


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента отражения двух и пяти слоев, оптимизированных на длину волны 820 нм, расчетные (1 –SiO2/$HfO_2/SiO_2/Al_2O_3/HfO_2$, 2 – Al_2O_3/HfO_2) и измеренные (3 – $SiO_2/HfO_2/SiO_2/Al_2O_3/HfO_2$, 4 –$Al_2O_3/HfO_2$).

Несмотря на расхождение расчетной и полученной рабочей длины волны, уменьшение коэффициента отражения и достаточно высокая эффективность перекачки энергии из нулевого в первый порядок дифракции подтверждают применимость данного метода, в том числе, и для изготовления фазовых дифракционных аттенюаторов.

Большой практический интерес представляет развитие подхода на основе полученных результатов [7] к созданию ДА, оптимизированных для работы на длинах волн в диапазоне 1030-1064 нм. Это в настоящее время самый популярный диапазон для мощных импульсных лазеров. В предлагаемом подходе используется предварительно напыленный стоп-слой, что гарантирует высокую воспроизводимость и точность фазового сдвига. Это важно для увеличения выхода годных ДА с воспроизводимым диапазоном изменения пропускания в нулевом порядке дифракции. Однако, необходимо попытаться полностью реализовать хотя бы в расчете снижение отражения от дифракционной структуры до величины менее 0,2 %, характерной для обычных антиотражающих покрытий. Существенное уменьшение отражения от дифракционной структуры снижает паразитное светорассеяние и позволяет снизить требования к теплоотводу от экрана на входной стороне ДА.

Моделирование многослойной структуры для дифракционного аттенюатора

В отличие от работы [7], в качестве конструкционного слоя с высоким коэффициентом преломления был выбран не ZrO_2 или HfO_2, а оксид тантала Ta_2O_5, поскольку он обладает высоким показателем преломления (n = 2,076 на 1064 нм [10]) и достаточно быстро [11] травится методом реактивного ионного травления, что очень важно в случае формирования дифракционной структуры нескольких слоев из различных оксидов или смеси оксидов перед стоп-слоем. На подложку из плавленого кварца последовательно наносятся слой с высоким коэффициентом преломления из Ta_2O_5 и затем слой Al_2O_3, выполняющий функцию стоп-слоя. Оба слоя имеют толщину $\lambda/(4n_i)$ (где n_i – коэффициент преломления i-го слоя). Над ними необходимо сформировать слой, который обеспечит сдвиг фазы $\lambda/2$ на проход и минимальное отражение. Моделирование с перебором материалов верхнего слоя, в котором формируется бинарная фазовая дифракционная структура, показало, что необходимый антиотражающий эффект и фазовая глубина на половину длины волны достигаются, если в качестве материала этого слоя выбрать стекло ВК7. Результаты моделирования показаны на рис. 3. Графики 1 и 2 имеют минимумы менее 0,1% на длине волны 1064 нм. При этом оптимальная (с точки зрения получения минимума отражения) толщина верхнего слоя из ВК7 составила 1061 нм, что на 11 нм больше, чем требуется на длине волны 1064 нм при показателе преломления 1,5066. Но разница на 1% не влияет существенно на дифракционную эффективность в нулевом порядке. Высокопрочное покрытие на основе слоев Al_2O_3/Ta_2O_5 может быть также использовано для просветления обратной плоской стороны дифракционного аттенюатора.

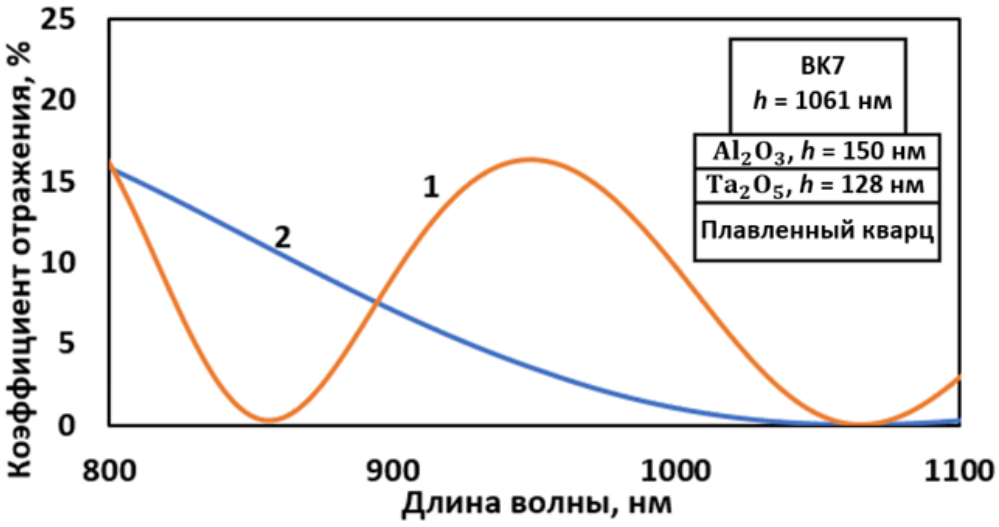


Рис. 3. Расчетные спектральные зависимости коэффициента отражения трех ($BK7/Al_2O_3/Ta_2O_5$ (1)) и двух (Al_2O_3/Ta_2O_5 (2)) слоев, оптимизированных на длину волны 1064 нм

К сожалению, стекло BK7 нельзя напылить. Насколько нам известно, ни один из используемых в оптике для напыления прозрачных оксидов не обладает показателем преломления $n = n_{BK7}$ на длине волны 1064 нм. Но такой же коэффициент преломления в заданной области спектра может быть получен путем формирования верхнего слоя в виде гибридной пленки из смеси оксидов SiO_2 (n = 1,45) и Ta_2O_5 (n = 2,076) в соотношении, необходимом для получения коэффициента преломления как у стекла BK7 вблизи длины волны 1064 нм (1,5066). При магнетронном ВЧ напылении необходимое соотношение оксидов может быть достигнуто за счет выбора соотношения площади, занимаемой оксидами на мишени.

Заключение

В ходе работы была смоделирована структура дифракционного аттенюатора для длины волны 1064 нм. Подобран необходимый показатель преломления верхнего слоя, в котором формируется фазовый дифракционный рельеф. Продемонстрирована возможность применения метода формирования бинарного фазового рельефа в многослойных покрытиях, ранее использованного для компьютерно-синтезированных голограмм, к изготовлению дифракционных аттенюаторов.

Относительно недавно были предложены амплитудные аттенюаторы на основе псевдослучайно расположенных точечных отверстий в слое фольги [11], позволяющие регулировать интенсивность излучения мощного лазера без изменения характеристик лазера. В перспективе данный принцип может быть распространен и на дифракционные аттенюаторы, которые могут быть выполнены в виде псевдослучайной фазовой структуры в многослойном покрытии, обеспечивая более высокую стойкость к мощному лазерному излучению и уменьшение интенсивности светорассеяния в высокие дифракционные порядки.

Таким образом, продемонстрировано, что предложенный подход с многослойным покрытием применим к созданию дифракционных аттенюаторов с высокой воспроизводимостью фазового сдвига и низкими потерями на отражение для мощных лазеров ближнего ИК диапазона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Полещук А. Г.* Дифракционные аттенюаторы лазерного излучения: метод изготовления и оптические характеристики / А. Г. Полещук, А. Р. Саметов, В. В. Донцова, Р. В. Шиманский // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 86–95.

2. *Полещук А. Г.* Дифракционные фильтры для управления излучением мощных лазеров / А. Г. Полещук, А. И. Малышев, А. А. Харисов, В. В. Черкашин // Труды конференции. – 1998.

3. *Полещук А. Г.* Дифракционный аттенюатор с переменным пропусканием : пат. 2287859 Рос. Федерация / А. Г. Полещук, Д. Э. Денк, Л. Ин-сеуп. – 2006.

4. Thorlabs. Circular Variable ND Filters [Электронный ресурс]. – URL: https://www.thorlabs.com/item/NDC-50C-4M (дата обращения: 09.05.2026)

5. Thorlabs. Rectangular Variable ND Filters [Электронный ресурс]. – URL: https://www.thorlabs.com/rectangular-continuously-variable-metallic-neutral-density-filters?tabName=Overview.

6. *Thorlabs.* Glan-Taylor Calcite Polarizers [Электронный ресурс]. – URL: https://www.thorlabs.com/glan-taylor-calcite-polarizers?pn=GT5&tabName=Overview (дата обращения: 09.05.2026).

7. *Корольков В. П.* Синтез фазовых компьютерно-синтезированных голограмм без травления подложки для задач оптического контроля и микрообработки / В. П. Корольков, В. Е. Зайцева, Д. А. Белоусов, А. И. Малышев, С. К. Голубцов, В. Н. Бельтюгов, А. Г. Седухин // Оптический журнал. – 2026. – Т. 93, № 5. – С. 15–23. – DOI: 10.17586/1023-5086-2026-93-05-15-23.

8. Elfström H. et al. Diffractive elements with novel antireflection film stacks //Optics Express. – 2004. – Т. 12. – №. 25. – С. 6385-6390. – https://doi.org/10.1364/OPEX.12.006385.

9. *Poleshchuk A. G.* Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements / A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov // International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro-and Nanotechnologies : proceedings. – SPIE, 2007. – Vol. 6732. – P. 130–139.

10. Refractive index for Ta2O5 [Электронный ресурс]. – URL: https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Ta2O5&page=Bright-amorphous (дата обращения: 09.05.2026).

11. Lee K. P. Comparison of plasma chemistries for dry etching of Ta_2O_5./ Lee K. P., Jung K. B., Singh R. K., Pearton S. J., Hobbs C., Tobin P.// *J. Vac. Sci. Technol.* – 2000. –V. 18. – N 4. – P. 1169–1172. – https://doi.org/10.1116/1.582319.

12. *Park S. C.* Random pinhole attenuator for high-power laser beams / S. C. Park, H. Yun, J. W. Yoon, S. K. Lee, J. H. Sung, I. W. Choi, C. H. Nam, K. T. Kim // High Power Laser Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. e34. – DOI: 10.1017/hpl.2024.15. – DOI:10.1017/hpl.2024.15.

© В. Е. Зайцева, В. П. Корольков, 2026

УДК 535.417: 535.421
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-20-26

С. А. Шойдин[1]✉, А. Л. Пазоев[1]

Паттерн структурированного света работает как голограмма

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

Аннотация: известно, что в работах по сжатию голографической информации наметился кризис, связанный с очень большой информационной емкостью голограмм. Такой, что передача одного голографического видеоряда методами стандартной строчно-кадровой развертки занимала бы весь доступный человечеству радиодиапазон. Методы энтропийного сжатия не давали желаемого результата, что заставляло откладывать ожидания появления голографического TV и вместе с ним систем 3D дополненной реальности на десятилетия [1] и даже столетия [2].

Ключевые слова: голография, паттерн, 3D голографическое видео, голограмма

S. A Shoydin[1]✉, A. L. Pazoev[1]

The structured light pattern works like a hologram

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

Abstract. It is known that there is a crisis in the work on the compression of holographic information, which is associated with the very large information capacity of holograms. This means that the transmission of a single holographic video sequence using standard line-frame scanning methods would take up the entire radio spectrum available to humanity. The use of entropy compression methods did not yield the desired results, leading to delays in the development of holographic TV and 3D augmented reality systems for decades [1] and even centuries [2].

Keywords: holography, pattern, 3D holographic video, hologram

Введение

Высказанные одним из основателей голографии, академиком Ю. Н. Денисюком предположения о том, что искать решение проблемы следует не в области математики и энтропийного кодирования, а в самой структуре голограмм [3], оправдались. В работах [4-6] было показано, что есть, как минимум, два пути для осуществления эффективного сжатия голографического видеоряда. Это разделение пространственных частот в голограмме на группу несущих частот и на их девиацию, что в одномерном случае напоминает известный в радиотехнике метод передачи информации на одной боковой частоте, широко распространившийся с названием Single Side Band (SSB). Действительно, этот метод помог решить проблему сжатия голографического видео до нужных объемов [4, 5].

Однако, в процессе работы над ним было отмечено, что разложение голографического сигнала в двумерный спектр может приводить к снижению контраста восстановленного изображения, и поэтому лучше представлять 3D видеосигнал разло-

жением не по гармоническим функциям, а по его собственным функциям. Такое представление 3D объектов широко применяется в геодезии, где собственными функциями являются текстура поверхности 3D объекта и его карта высот [6].

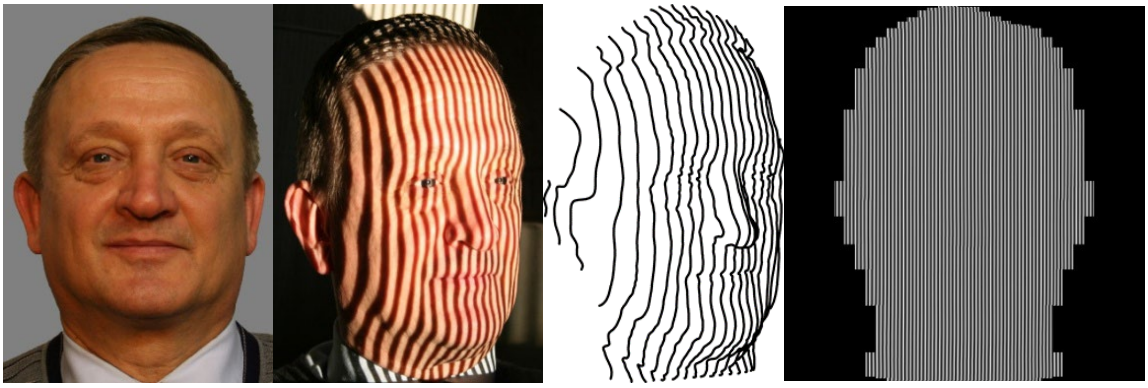
Регистрируя текстуру поверхности обычным фотографическим методом и карту высот методом структурированного света, авторы заметили, что один из видов структурированного света очень похож на саму голограмму.

Метод структурированных полос

Действительно, искривления вертикальных полос, латерально падающих на 3D объект, напоминают опытному глазу структуру голограммы, но только с очень большим периодом, в тысячи раз превышающим характерные периоды изобразительных голограмм. В изобразительных голограммах, записанных, например, в схеме Лейта-Упатниекса, этот период составляет микрометры, а полученные паттерны структурированного света имели периоды, сравнимые с миллиметрами и даже с сантиметрами. Это напоминало голограммы, записанные в радиодиапазоне электромагнитного спектра. Учитывая результаты по разделению пространственных частот голограммы на несущие и их девиацию, стало ясно, что несущие из радиодиапазона можно перенести в видимый, просто уменьшая период при сохранении всех искривлений полос структурированного света. В самом простом виде это делается проведением полос по точкам, лежащим посередине между каждыми двумя полосами. При этом частота увеличивается вдвое. Затем, уже над получившейся структурой полос можно сделать такую же операцию удвоения частоты, затем еще, и так до нужной частоты. Это очень наглядно доказывает принцип сделанного нами опыта по увеличению несущей частоты. Однако, реально, увеличение пространственной частоты было сделано стандартными методами аппроксимации, что позволило впервые утверждать, что паттерн структурированного света в виде вертикальных полос, латерально падающий на 3D объект, зафиксированный на материальном носителе, работает также как голограмма [7]. Однако, такая смелая гипотеза требовала проверки.

Численный эксперимент

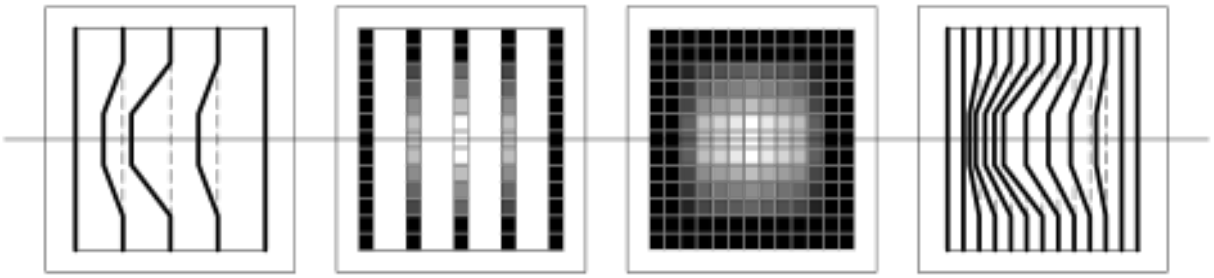
При съемке текстуры регистрация идет обычным фотографическим методом (рис. 1а). Карта высот составлялась методом освещения 3D объекта структурированным светом (рис. 1б) и выделением искривленных полос (рис. 1в). Выделенные искривленные полосы используются в качестве базы для увеличения пространственной частоты методом биссектрис или методом аппроксимации.



а) б) в) г)

Рис. 1. Регистрация 3D объекта в виде текстуры
(а), латерально падающего на 3D объект света (б), выделения искривленных полос (в), увеличения несущей пространственной частоты (г)

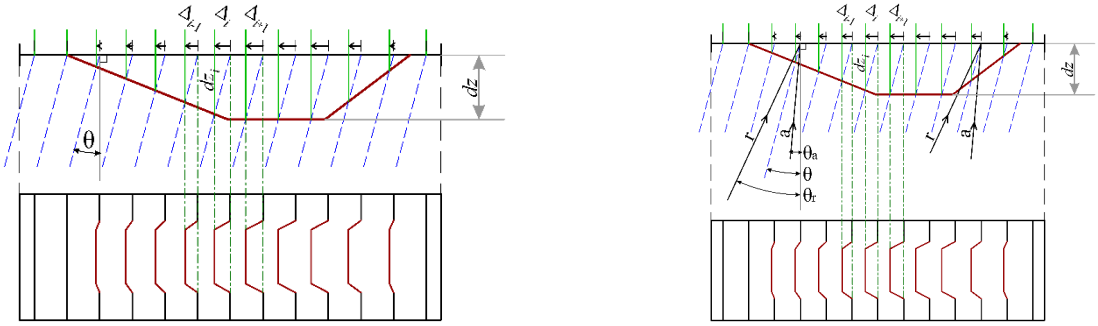
Действительно, указанный метод увеличения пространственной частоты обладает свойствами сохранения девиации. На рис. 2 показано схематически, как на примере освещения призмы структурированным светом можно увидеть увеличение пространственной частоты при одновременном сохранении амплитуды девиации, выразившейся в смещении полос от основания призмы к вершине (рис. 2а). Здесь медианное увеличение частоты заменено на аппроксимацию. На первом этапе стандартными операторами величина смещения была преобразована в цвет (рис. 2б), на втором этапе цвет был аппроксимирован на незаполненные области (рис. 2в), а на третьем этапе цвет снова был преобразован в смещение полос (рис. 2г). Получившаяся на третьем этапе структура имела те же смещения, какие имела исходная в тех же участках, но частота полос увеличивалась на управляемую величину. При этом, и на структуре рис. 2а и на структуре рис. 2г будет происходить дифракция, причем в соответствии с законом Брэгга на углы, пропорциональные отношению длины волны к периоду решетки. А поскольку в нашем случае увеличение пространственной частоты проводилось пропорционально уменьшению длины волны, то углы дифракции в этом модельном случае сохранялись, обеспечивая заданную объектом голографирования дифракцию, восстанавливающую изображение исходного объекта – призмы. Также из рис. 2 видно, что запаздывание фазы при дифракции пропорционально смещению полос на плоскости. В длинах волн это запаздывание будет разным, меньше для малых длин волн и больше для больших. Однако, в метрических единицах, например, в сантиметрах оно будет одинаковым, одинаково формируя выпуклости и вогнутости 3D объекта, поскольку малые смещения фазы за счет малых длин волн компенсируются пропорциональным увеличением их количества.



а) б) в) г)

Рис. 2. На примере модели призмы показан метод увеличения несущей пространственной частоты,
(а) исходный паттерн пространственных полос, (б) его преобразование в цветные полосы шириной, задаваемой будущей несущей пространственной частотой, (в) аппроксимация цвета на всю плоскость, (г) обратное преобразование цвета в смещение полос

Прямое сходство дифракционных структур, образованных латерально падающими на 3D объект в виде призмы вертикальными полосами, показано на рис. 3. Это и понятно, поскольку косая проекция вертикальных структурированных полос, падающая на 3D фигуру (рис. 3а), дает их смещение в плоскости, перпендикулярной оптической оси фоторегистрирующего устройства аналогичное смещению интерференционных полос при съемке голограммы (рис. 3б).



а) б)

Рис. 3. Проекция структурированных
(а) и интерференционных (б) полос под углом θ на 3D объект в виде призмы. Смещение полос Δ_i пропорционально локальной толщине 3D объекта

Из сравнения рис. 3а и 3б можно наглядно видеть принципиальную схожесть механизмов искривления интерференционных и структурированных полос, что указывает на то, что дифракция на структурированных полосах образует восстановленные в минус первом порядке 3D изображения исходного объекта, близкие по форме к восстановленным компьютерными голограммами.

Для прямой проверки был проделан численный эксперимент, результаты которого приведены на рис. 4.

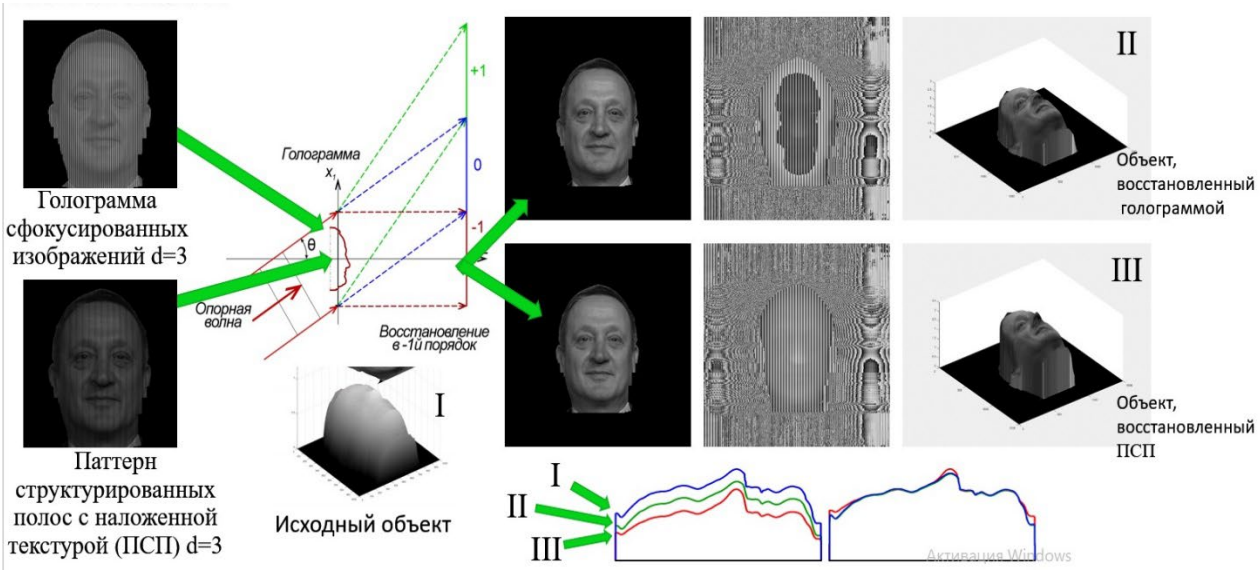


Рис. 4. Сравнение результатов дифракции восстанавливающей волны на голограмме (верхний ряд) и на паттерне, образованном структурированным светом из вертикальных полос (нижний ряд)

Прямой численный эксперимент по записи голограммы сфокусированных изображений и регистрации паттерна структурированных полос (ПСП) с одним и тем же периодом d=3 показал, что при восстановлении обеих структур восстанавливаются очень близкие по текстуре и по карте высот изображения. Римскими цифрами I на рис. 4 обозначены изображения исходного 3D объекта, цифрами II – результаты восстановления голограммой, а цифрами III – результаты восстановления дифракцией на зарегистрированном паттерне структурированных полос.

Видно, что 3D объект, восстановленный голограммой, и 3D объект, восстановленный ПСП, почти не отличаются. Небольшие отличия между ними видны по срезу центрального сечения I исходного 3D объекта (показано синим цветом), срезу II восстановленного голограммой изображения (показано зеленым цветом) и срезу III восстановленного ПСП изображения (показано красным цветом). Однако, эти отличия, как и аберрации, легко компенсируются необходимыми добавками к искривлению полос. Эта работа – впереди, но она понятна, и ее результат предсказуем, поскольку сами голограммы давно используются для исправления аберраций, почему бы ими же не исправить и полученные от ПСП аберрации. Оптимизм в этом вопросе вполне обоснован.

Таким образом, для восстановления на приемном конце радиоканала 3D голографического видео оказалось достаточно передавать не только меньше информации, чем содержится в спектральном представлении серии 3D голографических кадров, и даже не только двух кадров текстуры и карты высот как собственных функций 3D изображений, но и еще меньше.

Для синтеза полноценного 3D голографического видеоряда по радиоканалу оказалось достаточно передавать текстуру в телевизионном стандарте и структуру, по-

лученную при латеральном освещении 3D объекта структурированным светом из вертикальных полос. Последняя может иметь период много больше, чем период голограммы. Точнее, оказалось, что для полного узнавания объекта необходимо передавать всего пару десятков полос. Это означает, что к TV стандарту Full HD из строк длиной в 1920 пикселей, достаточно прибавить служебные строки, каждая из которых содержит 20 байт, чтобы на приемном конце канала связи были синтезированы компьютерные голограммы, образующие 3D голографический видеоряд. Таким образом, принципиальный запрет на передачу голографического 3D видео снят. Следующий этап развития заключается в создании соответствующей техники 3D регистрации и систем восстановления голографического видеоряда.

Следует отметить, что зрительное восстановление голограмм видеоряда не всегда является необходимым. В целом ряде технических задач достаточно организовать сравнение 3D кадров, переданных по каналу связи с различными эталонами, например, с 3D моделями конструируемых или эксплуатируемых объектов для контроля за их соответствием друг другу.

Области применения полученных результатов поистине безграничны, от визуализации 3D объектов и видеосюжетов, синтезированных искусственным интеллектом, до удаленного управления стыковкой с космическими или подводными аппаратами, не имеющими стыковочных узлов. И, конечно, особое место при реализации голографического телевидения будет занимать его применение в рекламе и обучении.

Заключение и основные выводы

Основные этапы развития идеи 3D голографического телевидения и 3D дополненной реальности можно представить в следующем виде:

– огромные успехи голографии в XX веке привели к необоснованным надеждам в XXI веке;

– появилось понимание, что огромные голографические видеопотоки нельзя уместить в доступный человечеству радиодиапазон;

– попытки сжать голографический видеопоток энтропийными методами не увенчались успехом;

– идеи Ю. Н. Денисюка о необходимости более глубокого изучения структуры самой голограммы подсказали верное направление исследований;

– решающую роль сыграло изучение самой структуры голограммы;

– природный запрет передачи голографического TV и реализации голографической 3D дополненной реальности был нами снят, а методы структурированного света позволили уместить голографический видеосигнал в стандартную телевизионную полосу частот;

– на основе изучения структуры голограмм были найдены три ступени сжатия голографической информации: спектральное сжатие, разложение по собственным функциям и гиперспектральное сжатие на основе использования структурированного света.

Для реализации проекта голографического TV осталось решить ряд технических задач. Они не носят характер природного запрета, как это было с проблемой сжатия голографического видеоряда, а являются чисто техническими проблемами. Следовательно, рано или поздно они будут решены. Лучше, если рано и собственными силами, чтобы нам не пришлось потом заниматься нашим любимым делом – импортозамещением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mark Lucente The First 20 Years of Holographic Video – and the Next_20. Available_from:_The_First_20_Years_of_Holographic_Video_and_the Next_20 [accessed Nov 09 2021]. https://www.researchgate.net/publication/268387890_The_First_20_Years_of_Holographic_ Video_-_and_the_Next_20 (дата обращения: 08.05.2026).

2. Pierre-Alexandre Blanche Holography, and the future of 3D display / Light: Advanced Manufacturing Published Review 2021, 2(4) : 446-459 (https://www.light-am.com/article/doi/10.37188/lam.2021.028 Архив Колледжа оптических наук Уайанта, Университет Аризоны, Тусон, Аризона, США https://www.light-am.com/archive_list_en.htm).

3. Денисюк Ю. Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? // Журнал технической физики, 1991.– Т. 61.–№ 8.– С. 149 –161.

4. Пазоев А. Л., Шойдин. С. А. Передача 3D голографической информации по радиоканалу методом, близким SSB // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2023. – С. 132–134. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27.

5. С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев. Сжатие 3D голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе // Оптический журнал. – Т. 89, № 3. – С. 79–88, 2022. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-79-88.

6. Патент РФ № 2707582. Способ дистанционного формирования голографической записи / Шойдин С. А., опубл. 28.11.2019.

7. Shoydin S. A. Structured Light Patterns Work Like a Hologram / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 4037. https://doi.org/10.3390/app13064037.

© С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, 2026

УДК 535.8
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-27-33

В. И. Наливайко[1]✉

Структура и пространственное разрешение халькогенидных резистов состава As_2S_3

[1]Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Аннотация. С помощью рентгеноструктурного анализа экспериментально показано отличие структуры кристаллического, стеклообразного и свеженанесенного аморфного слоя As_2S_3. Слоистая кристаллическая структура при трансформации в стекло или аморфное состояние формирует молекулярные нанообразования, ответственные за высокое пространственное разрешение пленочных резистов.

Ключевые слова: пленочный резист, халькогенидные слои, аморфное состояние

V. I. Nalivaiko[1]✉

Structure and spatial resolution of chalcogenide resists of As_2S_3 composition

[1]Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: nalivaiko@iae.nsk.su

Abstract. Differences in the structure of crystalline, glassy, and as-deposited As_2S_3 were experimentally demonstrated using X-ray diffraction analysis. The layered crystalline structure, when transformed into of glass or amorphous state, forms molecular nanostructures responsible for the high spatial resolution of film resists.

Keywords: film resist, chalcogenide layers, amorphous state

Введение

Картина рентгеновской дифракции слоистого кристаллического минерала аурипигмента As_2S_3, полученная с помощью рентгеновской дифракции, имеет узкий и интенсивный пик в области малых углов. Причины его появления связывают с межплоскостным расстоянием слоистого кристалла As_2S_3.

Вопрос о необходимости исследования роли головного мало-углового пика в картинах рентгеновской дифракции на стеклах состава As_2S_3 был поставлен Н. Фричше еще в 1984 году [1]. Наша интерпретация результатов рентгеноструктурных исследований предполагает в стеклах и аморфных слоях разрушение слоистой структуры кристаллического As_2S_3. В стеклообразных объемных образцах и аморфных слоях появляются молекулярные образования, так называемые кластеры [2].

Рентгеноструктурный анализ показал, что слоистая структура кристаллического As_2S_3 в стеклообразном состоянии преобразуется в молекулярные образования из 40 атомов в результате быстрого охлаждения. Происходит процесс

«вмораживания» молекулярных образований в напыляемую аморфную пленку As_2S_3. Особенно ярко процесс формирования молекулярных образований наблюдается в слоях As_2S_3, полученных с помощью термического напыления в вакууме с малой скоростью v = 2 Å/с.

Геометрические размеры d молекулярных образований вычислялись с помощью формулы первого порядка брэгговской дифракции:

$$2d \sin \theta/2 = \lambda,$$

где θ=18° – угол головного максимума молекулярной брэгговской дифракции рентгеновского излучения с длинной волны λ = 1,54 Å в стеклах и аморфных слоях.

Диаметры таких молекулярных образований в свеженанесенных слоях As_2S_3 составляют по величине единицы нанометров и изменяются при экспозиции. Поэтому нанесенные в вакууме аморфные халькогенидные слои имеют низкую фоточувствительность P = 10 Дж/см^2 и высокое пространственное разрешение не хуже 10^4 пар линий/мм.

Методы и материалы

Исследование структуры стекол и аморфных слоев As_2S_3 с помощью рентгеновского дифрактометра (λ = 1,54 Å) позволили установить наличие кластеров. Компьютерное моделирование структуры кластеров по ранее представленной методике [2, 3] подгонялось до совпадения теоретической кривой с экспериментальной (рис. 1).

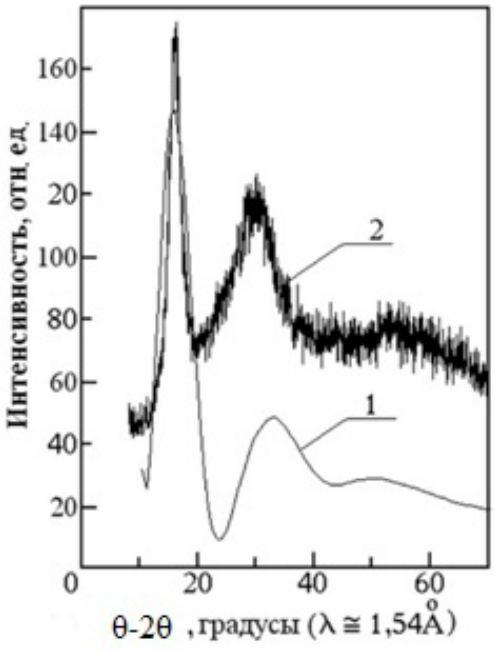


Рис. 1. Расчетная (1) и экспериментальная (2) кривые рентгеновской дифракции на свеженанесенных слоях As_2S_3

В результате получали молекулярное образование из 40 атомов, расчетная дифракционная кривая 1 которого максимально совпадала с экспериментальной дифракционной кривой 2. Это позволило идентифицировать дифракционный максимум при $2\theta=18^{o}$ для неэкспонированных слоев As_2S_3 как межмолекулярный (рис. 2).

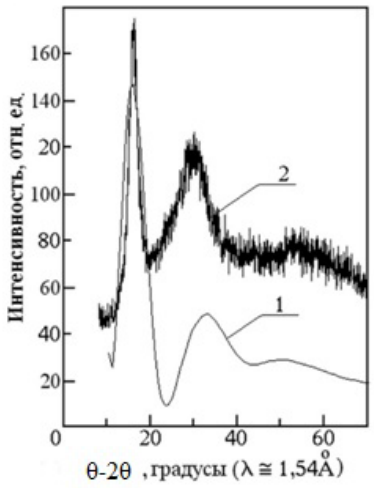


Рис. 2. Дифракция на слоях As_2S_3 толщиной 5 мкм, экспонированных лазерным излучением с $\lambda = 5145$ Å (кривая 1) и рентгеновским синхротронным излучением (кривая 2)

Экспонирование слоев As_2S_3 оптическим или рентгеновским излучением сопровождалось смещением молекулярного пика дифракции в область больших углов межатомной дифракции, что сопровождалось изменением оптических параметров слоев.

Результаты

В настоящее время изыскиваются различные способы улучшения разрешающей способности резистов. При этом повышаются требования к качеству наносимых слоев. Нами получены слои As_2S_3 с разрешением менее 100 нм, которые при малых толщинах после экспонирования различными видами излучения становятся нерастворимыми в кислотах и щелочах, и остаются устойчивыми к плазменному травлению.

Одной из основных целей работы была совершенствование технологии получения «тонких» халькогенидных слоев составов As_2S_3 в диапазоне толщин от сотен нанометров до нескольких микрон. Допуски по оптическому качеству и равномерности толщины слоев на подложке требовались на уровне $\lambda/10$ ($\lambda = 550$ нм).

Проведено оснащение напылительной установки планетарным механизмом вращения подложек диаметром до 60 мм для улучшения однородности толщины слоев. Было реализовано автоматизированное управление температурой испарителя по заданной программе в диапазоне от 0 до 400 ºС с точностью ± 4 ºС для

улучшения воспроизводимости оптических параметров слоев (рис. 3). Также был введен прецизионный лазерный контроль толщины слоев в процессе напыления с точностью до λ/10 (λ = 632 нм).



Рис. 3. Программируемая временная зависимость температурного режима испарителя вакуумной установки

Предложены и апробированы две методики оценки пространственного разрешения полученных образцов халькогенидных слоев: по величине размытия границ зон при бинарной записи зонных пластинок сфокусированным лазерным пучком и по количеству штрихов голографических решеток (рис. 4).

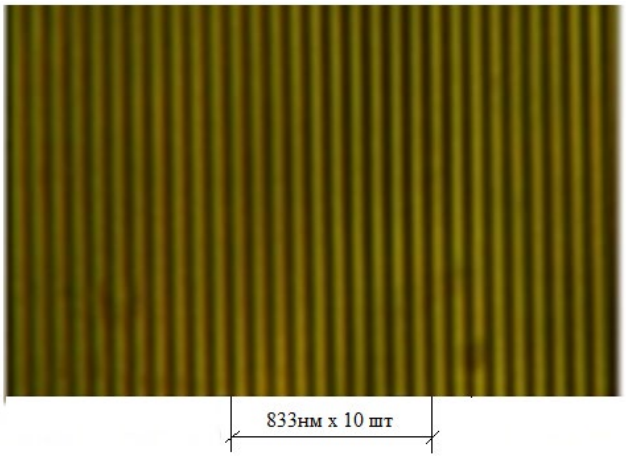


Рис. 4. Фрагмент рельефной отражательной решетки 1200 мм$^{-1}$ для вакуумной ультрафиолетовой области спектра и мягкого рентгеновского синхротронного излучения

При голографической записи (λ = 532 нм) рельефных дифракционных решеток, предназначенных для ортогонального ввода/вывода лазерного излучения в планарный волновод, период решеток в слоях состава As_2S_3 составлял по величине 420 нм, а ширина одного штриха решетки – 210 нм. Оптическое качество

решеток с уровнем паразитного рассеяния $5x10^{-6}$ свидетельствует о пространственном разрешении регистрирующей среды на уровне 100 нм.

На рис. 5 представлен экспериментальный образец делителя лазерных пучков с решетками, с помощью которых осуществляется ввод и вывод лазерного излучения (λ = 650 нм) в планарном волноводе с выведенными на экран 8 параллельными пучками. На экране, расположенном на расстоянии 15 см от делителя, видно, что выходные пучки имеют одинаковую интенсивность и малую расходимость относительно друг друга по углу.

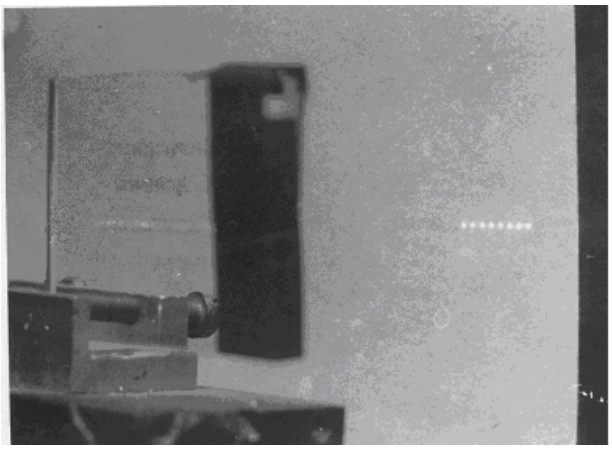


Рис. 5. Делитель лазерных пучков с голографическими решетками ввода/вывода излучения в планарный волновод

Приведенные успешные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности халькогенидных слоев составов As_2S_3 обеспечивать пространственное разрешении в нано-масштабном диапазоне при записи лазерным излучением. Высокое качество дифракционных решеток с 1200 пар линий/мм по низкому уровню паразитного рассеяния на уровне $5x10^{-6}$ в оптической области вакуумного ультрафиолета свидетельствует, что граница пространственного разрешения лежит в области меньше 100 нм.

Таким образом, создан существенный технологический, методический и экспериментальный задел на пути термовакуумного напыления халькогенидных резистов высокого оптического качества.

Реализован так называемый прямой способ оптического гравирования рельефных фазовых решеток на установке оптической литографии. Запись проводилась сфокусированным на поверхности регистрирующего слоя As_2S_3 лазерным пучком с длиной волны 370 нм. Диаметр сфокусированного пучка составлял 350 нм. Импульсная модуляция лазерного пучка в наносекундном диапазоне при записи рельефа обеспечила исключение образования так называемых «брустверов» на поверхности слоя, что способствовало уменьшению «паразитного» рассеяния получаемых решеток.

Выигрыш величины оптической задержки позволил сделать вывод о возможности уменьшения толщины регистрирующего халькогенидного слоя с 2

мкм до 0,4 мкм для получения решеток с единственным первым порядком дифракции. Продолжение работы с тестовыми решетками позволит экспериментально исключить влияние более высоких порядков дифракции и повысить разрешающую способность макета лазерного гетеродинного томографа [4, 5].

Показано преимущество оптического гравирования рельефа, позволяющего в 5 раз уменьшить толщину халькогенидного слоя. Так в работе [6] оптическим гравированием была реализована запись в реальном времени зонной пластинки в слое As_2S_3 толщиной 5 мкм с оптической глубиной в несколько длин волн на $\lambda = 550$ нм.

Обсуждение

Экспериментальные результаты рентгеноструктурного анализа позволили установить наличие молекулярных образований в стеклах и аморфных слоях As_2S_3, определить их наноразмеры и наблюдать трансформацию их молекулярной структуры в результате экспозиции лазерным или рентгеновским излучением (рис. 1, 2). Видно, что в результате взаимодействия аморфных слоев As_2S_3 с излучением происходит трансформация молекулярных образований в межатомные связи.

Заключение

Основные результаты структурных исследований и взаимосвязи структуры стекол и слоев As_2S_3 с пространственным разрешением можно кратко сформулировать:

– в единой сетке связей халькогенидных стекол и напыленных слоев присутствуют включения в виде молекулярных образований, что отличает их от оксидных стекол;

– структура массивного стекла As_2S_3 имеет молекулярную структуру, которая выражена менее ярко по сравнению с молекулярной структурой напыленных слоев;

– по аналогии с фотоматериалами типа Микроат-300 увеличение размеров зерна галоидно-серебряных кристаллов повышает фоточувствительность эмульсии слоев и понижает их пространственное разрешение, а нанометровые размеры молекулярных образований в структуре стекла и слоев As_2S_3 обнадеживают возможностью достичь еще более высокого их пространственного разрешения.

Благодарности

Работа выполнена согласно Госзаданию Минобрнауки 2026 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фричше Х. Некристаллические полупроводники. Физика за рубежом 1986. Серия А (исследования) Сборник статей. Пер. с англ, франц./ Сост.Ю.А. Данилов под ред. ак. А.С. Боровика-Романова, ак. Р.С. Сагдеева. – М.: Мир, 1986. – С. 122 – 146. (Fritzsche H. Physics Today. October 1984. P. 34.

2. Nalivaiko V.I., Yuryev G.S. Structural Studies of As_2S_3 Chalcogenide Films by X-Ray Synchrotron Radiation. Труды X Симинара Азиатско-тихоакеанской академии материалов и III Конференции «Материалы Сибири» – « Наука и технология наноструктурированных

материалов» / Ответ. редактор ак. Ф.А. Кузнецов. Институт неорганической химии имени А.В.Николаева СО РАН, Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН. Новосибирск, 2003. С. 422 – 423.

3. Наливайко В.И., Юрьев Г.С. Оптические фазовые рельефы в халькогенидных и оксидных стеклах. Харьковская Научная Ассамблея. Труды Международного научно-практического симпозиума «Функциональные покрытия на стеклах», 21 – 26 апреля 2003 г., Харьков, Украина, 2003. – С. 194 – 196.

4. Твердохлеб П.Е., Щепеткин Ю.А. Оценка предельной скорости послойного гетеродинного анализа характеристик рассеяния света в объемных оптических средах // Автометрия. – 2017. – 53. №2. – С. 19–29.

5. Твердохлеб П.Е., Щепеткин Ю.А., Штейнберг И.Ш. Исследование характеристик толстых дифракционных решеток методом лазерной гетеродинной томографии. Автометрия. – 2019. – Т. 55. № 1. – С. 26–34.

6. Наливайко В.И., Пономарева М.А. Формирование фазовых профилей дифракционных элементов высокого порядка дифракции в халькогенидных слоях // Интерэкспо Гео-Сибирь. XVII Международный научный конгресс. «СибОптика-2021. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». – 2021. – Т. 5. – С. 204–209. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-8-204-209.

© В. И. Наливайко, 2026

УДК 535.417
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-34-36

Ю. Ц. Батомункуев[1,2]✉

Ахроматизация внеосевого голограммного оптического элемента

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

Аннотация. В работе обсуждается проблема ахроматизация внеосевого голограммного оптического элемента (ГОЭ). Получено, что одним из следствий зеркально-линзовой модели толстого внеосевого ГОЭ является условие взаимной ахроматизации тонкого и толстого ГОЭ. Показано, что выбором фокусных расстояний и расположений тонкого и толстого ГОЭ может быть исправлена хроматическая аберрация положения внеосевого ГОЭ в заданной области спектра.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, ахроматизация

Yu. Ts. Batomunkuev[1,2]✉

Achromatization of nonaxial holografic optical element

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

Abstract. This paper discusses the problem of achromatization of off-axis holographic optical elements (HOE). It is found that one of the consequences of the mirror-lens model of a thick HOE is the condition of mutual achromatization of the thin and thick HOEs. It is shown that by choosing the focal lengths and locations of the thin and thick HOE, the chromatic aberration of the position of the off-axis HOE in a given spectral region can be corrected.

Keywords: holographic optical element, achromatization

Введение

Известно, что осевой голограммный оптический элемент (ГОЭ) может быть представлен в виде модели тонкой линзы [1,2]. Это представление позволяет выполнять габаритные и аберрационные расчеты как отдельных ГОЭ, так и оптических систем в которых используются ГОЭ, с применением простых оптических вычислительных программ. Но осевые тонкие ГОЭ обладают существенными недостатками, а именно, низкой дифракционной эффективностью, наличием недифрагировавшей волны, наличием положительных и отрицательных дифракционных порядков, низким уровнем отношения сигнал/шум. Из-за этих недостатков тонкие осевые ГОЭ не нашли широкого применения на практике. Внеосевые тонкие ГОЭ имеют такие же недостатки, но по отношению сигнал/шум внеосевые ГОЭ существенно превосходят осевые ГОЭ.

Методы и модели

В отличие от осевых ГОЭ, внеосевые ГОЭ обладают не только хроматической аберрацией положения, но и полевой хроматической аберрацией (или хроматической аберрацией сдвига). Эта хроматическая аберрация сдвига подобна хроматической аберрации дифракционной решетки, возникающей при использовании ее в качестве оптического элемента, формирующего изображение [3,4]. Исправление этой хроматической аберрации дифракционной решетки рассматривалось нами в работе [4]. Следует отметить, что линзовая модель тонкого ГОЭ может быть применена и при расчете габаритных и аберрационных характеристик внеосевого ГОЭ.

В работах [3,5] была предложена зеркально-линзовая модель толстого внеосевого ГОЭ. Учет толщины ГОЭ позволил представить толстый ГОЭ в виде физической модели, обладающей одновременно свойствами тонкой голограммной линзы, а именно тонкого внеосевого ГОЭ, и сферического зеркала.

Результаты

Одним из следствий зеркально-линзовой модели является тот факт, что хроматические аберрации первого порядка толстого (объемного) ГОЭ совпадают с соответствующими хроматическими аберрациями тонкого ГОЭ, так как известно, что у сферического зеркала хроматическая аберрация отсутствует. Поэтому способы исправление хроматической аберрации толстого ГОЭ в первом порядке совпадают с исправлением хроматической аберрации тонкого ГОЭ [6,7]. Так из формулы для внеосевого тонкого ГОЭ с фокусным расстоянием F_{to} на рабочей длине λ_c

$$\frac{1}{d_{tc}} + \frac{1}{d_{ti}} = \frac{k_t \lambda_c}{F_{to} \lambda_o}, \tag{1}$$

где d_{tc}, d_{ti} – расстояния от ГОЭ до точечного источника S и до мнимых изображений S`; λ_o – длина волны записи; k_t – порядок дифракции, следует, что хроматическая аберрация положения Δd_{ti} (по модулю) при изменении рабочей длины волны на величину $\Delta\lambda_c$ равна

$$\Delta d_{tc} = \frac{k_t \lambda_c d_{tc}^2}{F_{to} \lambda_o} \Delta\lambda_c. \tag{2}$$

Аналогичным образом из зеркально-линзовой модели получаем, что по модулю хроматическая аберрация положения толстого ГОЭ с фокусным расстоянием F_{vo} равна

$$\Delta d_{vc} = \frac{k_v \lambda_c d_{vc}^2}{F_{vo} \lambda_o} \Delta\lambda_c, \tag{3}$$

где d_{vc} – расстояния от толстого ГОЭ до точечных источников S`; k_v – порядок дифракции. Приравнивая в формулах (2) и (3) хроматические аберрации, получаем условие взаимного исправления хроматических аберраций толстого и тонкого ГОЭ:

$$\frac{k_v d_{vc}^2}{F_{vo}} = \frac{k_t d_{tc}^2}{F_{to}}. \qquad (4)$$

В работе [8] представлены варианты ахроматической системы из двух разнесенных осевых ГОЭ, аналогичные системы могут быть рассчитаны и для внеосевых ГОЭ.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что следствием представления внеосевого толстого ГОЭ в виде зеркально линзовой модели является возможность ахроматизации внеосевым тонким ГОЭ, и определено условие ахроматизации. Условие (4) представляет собой условие взаимного исправления хроматических аберраций внеосевых толстого и тонкого ГОЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙСПИСОК

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
2. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. – Л., ГОИ. – 1984. – 140 с.
3. Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Формирование сопряженных плоскостей внеосевого объемного цилиндрического голографического оптического элемента // Автометрия. – 2003. – № 2. – С. 23–29.
4. Батомункуев Ю.Ц., Тюшев Н.А. Особенности ахроматизации дифракционной решетки / Ю.Ц. Батомункуев // Сб. материалов VII Международной научной конференции «Гео-Сибирь-2011». Новосибирск: СГГА, – 2011. – Т.5, Ч.2. – С.42-49.
5. Батомункуев Ю.Ц. Зеркально-линзовая модель объемных голограммных оптических элементов / Ю.Ц. Батомункуев // Опт. журн. – 2009. – Т.76, № 7. – С. 48-52.
6. Батомункуев Ю.Ц. Ахроматизация объемных голограммных оптических элементов. / Ю.Ц. Батомункуев // Сб. материалов Международной научной конференции «СИБОПТИКА-2020». Новосибирск: СГУГиТ, – 2020. – Ч.1. – С. 139–145.
7. 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.
8. Батомункуев Ю.Ц. Расчет ахроматической дифракционной системы с исправленной сферической аберрацией (часть 1) / Ю.Ц. Батомункуев, А.А. Дианова // Интерэкспо ГЕОСибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 8 : Национальн. конф. с междунар. участ. «СибОптика-2019». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – С. 41–46.

© Ю. Ц. Батомункуев, 2026

УДК: 535.233
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-37-41

Ю. Ц. Батомункуев[1,2]✉, В. И. Жуков[3], Д. А. Швецов[3]

Определение размеров пузырей в жидкости Novec 649

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[3]Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: optotechic@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе в представлении лучевой оптики обсуждается влияние формы поверхности диэлектрической жидкости Novec 649 на размеры сферического пузыря, находящегося в объеме этой жидкости. Отмечается, что влияние поверхности жидкости Novec 649 важно при термографической визуализации пузырей, когда определение размеров и формы пузырей осуществляется по их изображениям, полученным с помощью тепловизора.

Ключевые слова: пузыри в жидкости, жидкость Novec 649

Yu. Ts. Batomunkuyev[1,2]✉, V. I. Zhukov[3], D. A. Shvetsov[3]

Determining the sizes of bubbles in Novec 649 fluid

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
Novosibirsk, Russian Federation
[3]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: optotechic@mail.ru

Abstract. This paper discusses the influence of the surface shape of Novec 649 dielectric fluid on the size of a spherical bubble within the fluid using ray optics. It is noted that the influence of the Novec 649 fluid surface is important in thermographic bubble imaging, where the size and shape of bubbles are determined from images obtained with a thermal imaging camera.

Keywords: bubbles in fluid, Novec 649 fluid

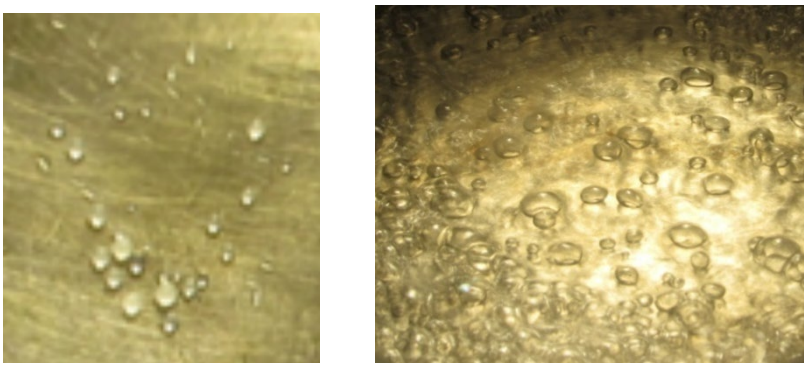
Введение

Форма и размеры пузырей, возникающих при кипении в диэлектрической жидкости, исследовались во многих работах, например [1-4]. Изучение влияния размеров и формы пузырей на свойства жидкости важно для выбора оптимальных режимов теплообмена охлаждающей жидкости в различных технических системах и устройствах [5,6]. Но повышение точности определения размеров и формы пузырей, например возникающих при кипении жидкости Novec 649, требует учета влияния изменения поверхности жидкости на форму и размеры пузырей. Это важно также в связи с тем, что при выполнении габаритного расчета и разработки экспериментальной установки для получения данных термографической визуализации пузырьков жидкости Novec 649 требуется выбирать оптимальное положение регистрирующей камеры,

чтобы искажения размеров пузырей были минимальными (не превышали заданных величин).

Методы и модели

На рис. 1 представлены фотографии пузырей, возникающих в процессе кипения в диэлектрической жидкости Novec 649.



а) б)

Рис. 1. Фотографии пузырей, возникающих в процессе кипения в диэлектрической жидкости Novec 649

В настоящей работе в представлении лучевой оптики обсуждается влияние на определение размеров и формы сферического пузыря, находящегося в объеме диэлектрической жидкости, изменения формы поверхности жидкости.

В работе используется физическая модель, в которой жидкость является прозрачной и оптически однородной, а поверхность жидкости в первом приближении может принимать плоскую, вогнутую или выпуклую формы (рис. 2). Также предполагается, что лучи света падают на поверхность пузыря со всех сторон, отражаются и преломляются на сферической границе пузыря по законам лучевой оптики. Так как размеры пузырей являются малыми по сравнению со световым диаметром объектива регистрирующей камеры, в работе не рассматриваются искажения (аберрации) размеров и формы пузырей, вносимые оптической системой камеры.

Результаты

На рис. 2а пунктирной линией показано мнимое изображение сферического пузыря, сформированного горизонтальной поверхностью жидкости. Учет преломления лучей света на плоской поверхности жидкости приводит к смещению и деформации формы пузыря. На фотоматрице камеры формируется изображение пузыря в сдвинутом положении. Из-за сдвига изображения пузыря к поверхности жидкости, то есть из-за изменения (уменьшения) расстояния от пузыря до объектива камеры, размер изображения пузыря на фотоматрице камеры становится больше, по сравнению с изображением, когда не учитывается преломление

света на поверхности жидкости. Относительное увеличение размера пузыря может быть оценено по формуле

$$\gamma = \frac{(n-1)l}{ns},$$

где n – показатель преломления жидкости; l, s – соответственно, расстояния от поверхности жидкости до пузыря и до объектива камеры ($l<<s$). При отношении l/s, равном примерно десяти, и показателе преломления жидкости n = 1,33, получаем относительное увеличение размера пузыря γ = 2,5 %. Таким образом, учет преломления света на поверхности жидкости приводит к увеличению значения радиуса пузыря, что необходимо учитывать при близком расположении объектива камеры к поверхности жидкости. Это искажение размера пузыря может быть исправлено увеличением расстояния от поверхности жидкости до объектива камеры.

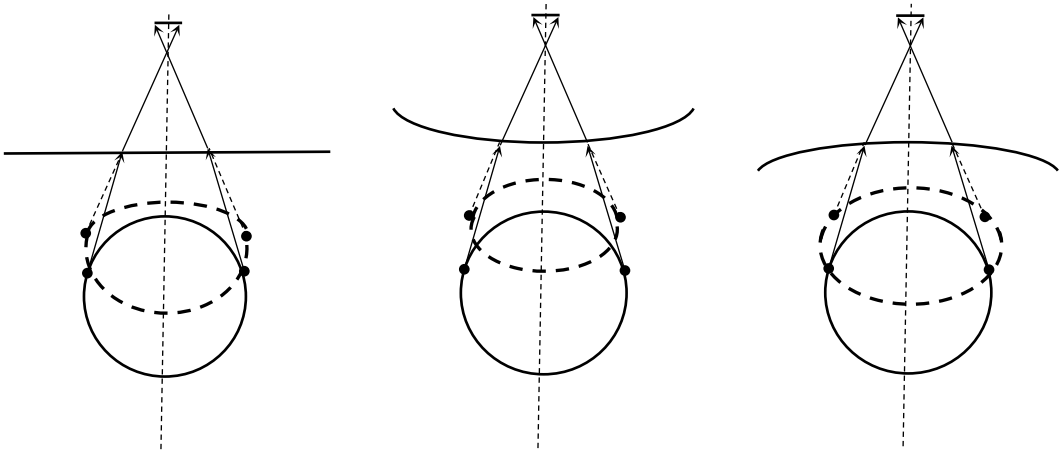


Рис. 2. Схема формирования поверхностью жидкости изображений пузыря в диэлектрической жидкости:
а) плоской поверхностью, б) вогнутой поверхностью, в) выпуклой поверхностью. Штриховой линией показано изображение пузыря

Для вогнутой или выпуклой поверхностей жидкости (рис. 2б, 2в) имеет место дополнительное смещение и деформация формы пузыря. На рис. 2б пунктирной линией показано мнимое изображение сферического пузыря, сформированного вогнутой поверхностью жидкости. На фотоматрице камеры формируется изображение, именно этого пузыря, сдвинутого и деформированного. Диаметр изображения пузыря в жидкости меньше истинного значения диаметра пузыря. Из-за дополнительного сдвига изображения пузыря к поверхности жидкости, то есть из-за изменения (уменьшения) расстояния от пузыря до центра объектива камеры, размер изображения пузыря на фотоматрице камеры становится больше.

Относительное изменение размера изображения пузыря может быть оценено для вогнутой поверхности жидкости по формуле

$$\gamma = \frac{(n-1)l}{ns}\left(1+\frac{l}{nR}\right),$$

где n – показатель преломления жидкости; l, s – соответственно, расстояния от поверхности жидкости до пузыря и до объектива камеры ($l<<s$), R – радиус кривизны вогнутой поверхности.

Заключение

Рассмотренное в работе влияние формы поверхности жидкости Novec 649 на размеры пузырьков важно при их термографической визуализации (рис. 3), когда определение размеров и формы пузырей осуществляется по их изображениям, полученным с помощью тепловизора.

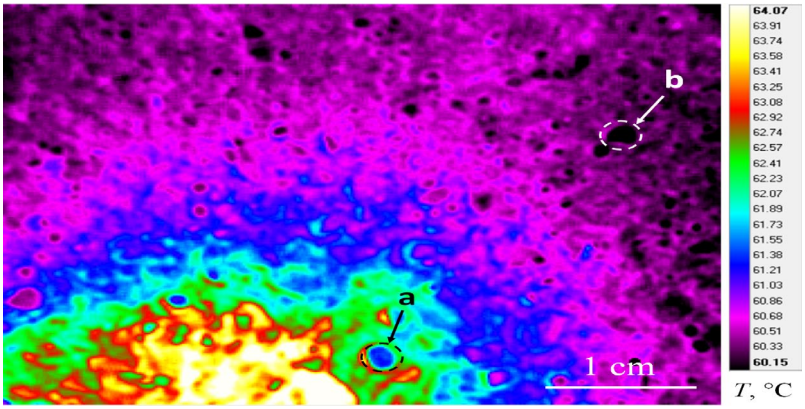


Рис. 3. Термографическая визуализация пузырей (a,b), возникающих в процессе кипения в диэлектрической жидкости Novec 649

Благодарности

Работа по отладке метода получения данных термографической визуализации пузырьков проводилась в рамках гранта № 075-15-2025-007 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Отладка термографической регистрации пузырьков, при исследовании процессов теплоотдачи при кипении осуществлялась при финансовой поддержке Государственного задания с ИТ СО РАН (№ 126021217058-9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Johnson M.A., De la Pena Jr.J., Mesler R.B. Bubble Shapes in Nucleate Boiling. – AIChE J.– 1966. – V.12 (2). – P.344–348.

2. Hospeti N.B., Mesler R.B. Vaporization at the base of bubbles of different shape during nucleate boiling of water. – AIChE J.–1969. – V. 15 (2). – P. 214–219, https://doi.org/10.1002/aic.690150217.

3. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles. – New York: Academic Press, 1978. – 380 p.

4. Dorokhov A.R., Zhukov V.I. Bubble growth rate and phenomenon of degenerate boiling of a fluid in the form of film vaporization. – J. Eng. Phys. Thermophys. – 1999. – V.72 (3). – P. 430–437. https://doi.org/10.1007/BF02699206.

5. Chinak A.V., Gorelikova A.E., Kashinsky O.N., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow. – Int. J. Heat Mass Transf. – 2018. – V. 118. – P. 785–801. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2017.11.022.

6. Гуляев Н. А., Светоносов А. И., Легостаев Д. Е., Филиппский К. А., Евдокименко И.А. Экспериментальное исследование движения пузырей в вертикальном пучке стержней // Сб. материалов Международной научной конференции «СИБОПТИКА-2025». Новосибирск: СГУГиТ. – 2025. – Т. 8. – С. 203–207.

© Ю. Ц. Батомункуев, В. И. Жуков, Д. А. Швецов, 2026

УДК 681.786
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-42-49

А. А. Лузанов[1]✉, *И. А. Коняхин*[1]

Многоканальная оптико-электронная система измерения деформаций кораблестроительного дока

[1]Национальный исследовательский университет ИТМО,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: aaluzanov@itmo.ru

Аннотация. Доковый прогибомер ПОЭД-02460, предназначенный для контроля деформации и смещений корабельных доков и судов, работает на основе метода обратной засечки. Реперные метки, которые используются для определения величины смещения, представляют собой четыре светодиода, но, фактически, для определения смещения используют лишь один светодиод. Это понижает точность системы и делает ее уязвимой для внешних факторов. В случае использования большего количества светодиодов точность системы повышается, но появляется переопределенная система уравнений, которая зачастую не имеет точного решения. Цель работы заключается в поиске оптимальных методов решения переопределенной системы для получения минимальной погрешности определения смещения. Для этого были рассмотрены методы выбора лишь части уравнений, метод наименьших квадратов, QR-разложение и метод псевдообратной матрицы. В результате погрешность измерения смещения dx составила для метода выбора уравнений от 0,030 мм до 0,138 мм, а dy составила от 0,061 мм до 0,115 мм. Показатели погрешности dx и dy, найденные другими методами, составили 0,034 и 0,026 соответственно.

Ключевые слова: доковый прогибомер, оптико-электронная система, координаты, переопределенные системы, метод обратной засечки

A. A. Luzanov[1]✉, *I. A. Konyakhin*[1]

Multi-channel optoelectronic system for measuring the deformations of a shipbuilding dock

[1]ITMO University, Saint-Petersburg, Russian Federation
e-mail: aaluzanov@itmo.ru

Abstract. The POED-02460 dock deflectometer, designed for monitoring the deformation and displacement of shipyard docks and vessels, operates on the basis of the resection method. The reference marks used to determine the displacement magnitude consist of four LEDs; however, in practice, only a single LED is used for displacement determination. This reduces the accuracy of the system and makes it vulnerable to external factors. Utilizing a larger number of LEDs increases system accuracy, but it results in an overdetermined system of equations, which often lacks an exact solution. The aim of this work is to find optimal methods for solving the overdetermined system to achieve the minimum error in displacement determination. To this end, the method of selecting a subset of equations, the least squares method, QR-decomposition, and the pseudoinverse matrix method were evaluated. As a result, the displacement measurement error for the equation selection method ranged from 0.030 mm to 0,138 mm for dx, and from 0,061 mm to 0,115 mm for dy. The dx and dy error values obtained by the other methods were 0,034 mm and 0,026 mm, respectively.

Keywords: dock deflectometer, optical-electronic system, coordinates, overdetermined systems, resection method

Введение

В настоящее время особое значение приобретает точное определение координат элементов крупногабаритных конструкций, таких как мосты, высотные здания, промышленные комплексы, транспортные узлы и кораблестроительные доки. Для решения таких задач используют многоканальные оптико-электронные системы. Подобные системы позволяют с высокой точностью определять и контролировать положение объекта в реальном времени.

Одной из таких оптико-электронных систем является доковый прогибомер ПОЭД-02460 (рис.1), предназначенный для контроля деформаций плавающих доков в вертикальной плоскости в процессе их эксплуатации и постройки, а также для измерения прогиба судов при погрузочно-разгрузочных работах [1, 2].

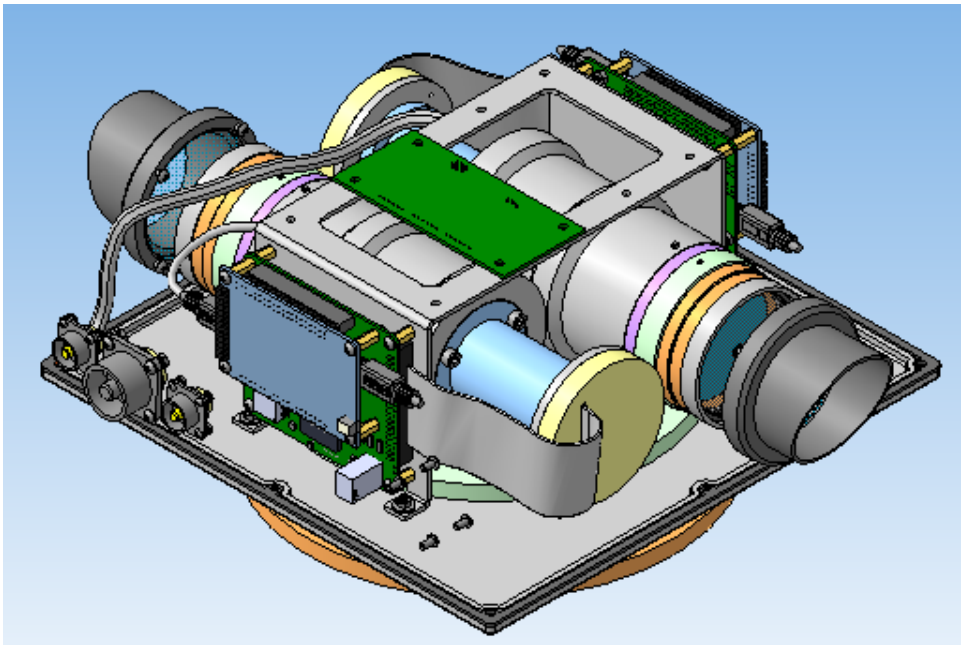


Рис. 1. 3D модель докового прогибомера ПОЭД-02460

Контроль этих параметров необходим для предотвращения аварийных ситуаций и повышения эффективности работы доковых и портовых служб. Прогибомер включает базовый блок, формирующий приборную систему координат, и измерительные каналы, регистрирующие активные реперные метки [3, 4]. Реперная метка состоит из четырех инфракрасных светодиодов Vishay TSAL6200 [5] расположенных в форме правильного ромба (рис. 2).

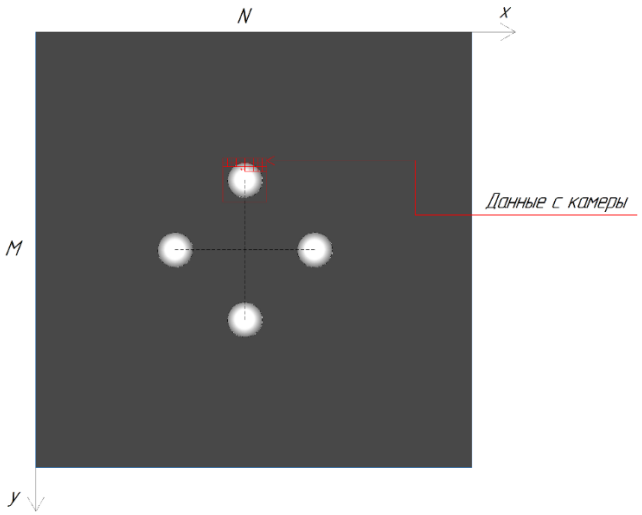


Рис. 2. Расположение светодиодов на реперной метке, вид с камеры

При определении координат смещения и деформации используется лишь один из светодиодов. Все четыре нужны только на первом этапе, чтобы компьютер опознал в них конкретный шаблон группы пикселей, которые относятся к реперной метке, и чтобы система не перепутала ее с другим источником излучения или бликом. После этапа проверки и идентификации метки система переходит в режим слежения за одним-единственным световым пятном [6]. Сканирование только одного светодиода позволяет системе быстро обрабатывать информацию о перемещении реперной метки, но это делает систему уязвимой перед внешними факторами и лишает возможности проанализировать смещение относительно других светодиодов. Если использовать все четыре светодиода, то при определении значений деформации при анализе данных будет возникать переопределенная система уравнений. Главная проблема таких систем – это отсутствие точного решения, поэтому приходится находить приближенный ответ. Такие системы часто решают методом отбрасывания части уравнений до тех пор, пока их количество не станет равным числу неизвестных. Данный метод позволяет быстро получить решение, но в процессе он уничтожает важную информацию по перемещению реперных меток. В связи с этим, основной задачей исследования является анализ и моделирование работы докового прогибомера и методов решения переопределенных систем уравнений, возникающих при эксплуатации оптико-электронной системы. Это необходимо для обеспечения минимальной погрешности измерения координат смещения и деформации. Главная цель работы заключается в повышении точности многоканальной оптико-электронной системы докового прогибомера за счет использования всех данных реперных меток и решения полученной системы переопределенных уравнений.

Методы и материалы

Работа прогибомера основана на методе обратной засечки (Рис.3), что позволяет определять координаты по нескольким маркерным точкам с уже известными координатами [7, 8, 9]. В связи с тем, что для докового прогибомера прин-

цип работы аналогичен трехточечной модели [10, 11], было принято решение рассмотреть эффективность методов решения переопределенной системы уравнений сперва на схеме с тремя реперными метками.

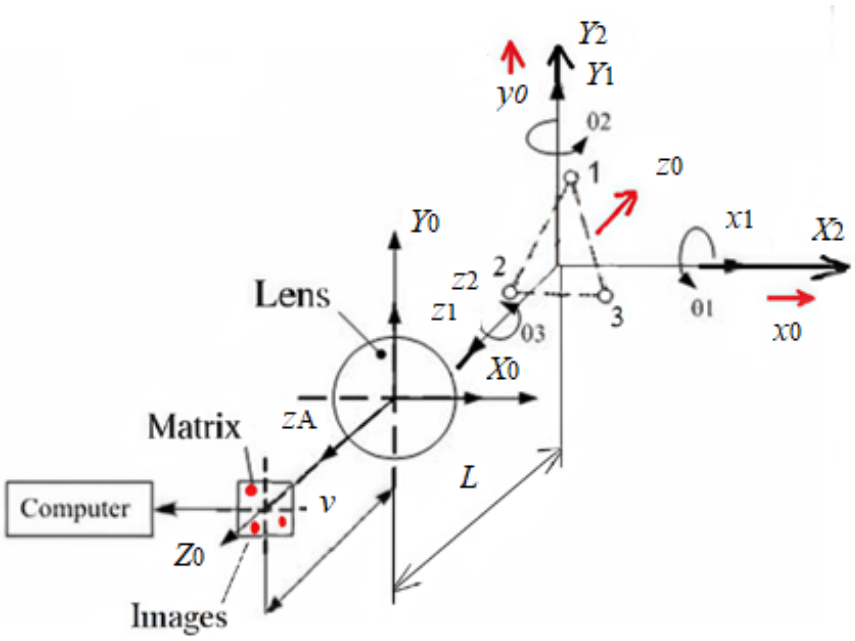


Рис. 3. Общая схема измерительной системы методом обратной засечки [12]

В результате работы оптико-электронной системы, получаем систему из шести уравнений и пяти неизвестных:

$$X_1 \cdot \left(\frac{f-L}{f}\right) - x_1 = x_0 + 0 + 0 + z_1\theta_2 - y_1\theta_3,$$

$$Y_1 \cdot \left(\frac{f-L}{f}\right) - y_1 = 0 + y_0 - z_1\theta_1 + 0 + x_1\theta_3,$$

$$X_2 \cdot \left(\frac{f-L}{f}\right) - x_2 = x_0 + 0 + 0 + z_2\theta_2 - y_2\theta_3,$$

$$Y_2 \cdot \left(\frac{f-L}{f}\right) - y_2 = 0 + y_0 - z_2\theta_1 + 0 + x_2\theta_3,$$

$$X_3 \cdot \left(\frac{f-L}{f}\right) - x_3 = x_0 + 0 + 0 + z_3\theta_2 - y_3\theta_3,$$

$$Y_3 \cdot \left(\frac{f-L}{f}\right) - y_3 = 0 + y_0 - z_3\theta_1 + 0 + x_3\theta_3,$$

где f – фокусное расстояние; L – расстояние, на котором расположена визирная цель $X_1, Y_1, X_2, Y_2, X_3, Y_3$ – значения координат реперных меток; $x_0, y_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ –

измеряемые величины перемещения; $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$ – координаты излучающих мишеней в системе координат $X_2 Y_2 Z_2$ визирной цели.

Для оценки эффективности рассматриваемых методов необходимо сравнить значения смещений, рассчитанные с использованием метода наименьших квадратов, QR-разложения и псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза, с заранее заданными значениями смещения [13, 14, 15]. На основе моделирования в системе Mathcad определяется итоговая погрешность на основе метода исключения отдельных уравнений. Полученные погрешности сопоставляются между собой для выявления эффективности специальных методов, в отличие от выбора только отдельных уравнений. Предположим, что из-за влияния шумов координаты изображений измерены с погрешностью, равной доле *k* от величины одного пикселя фотоприемной матрицы. Отсюда погрешность измерения координат изображений равна:

$$\sigma = k \cdot d,$$

где d – размер пикселя, равный 0,0022 мм; k – коэффициент точности ($k = 0{,}1$).

Моделирование в Mathcad было выполнено с учетом данной инструментальной погрешности для имитации условий реального измерительного процесса. Решение переопределенной системы методом выбора части уравнений преобразует ее к обычной системе уравнений. Однако финальный результат сильно зависит от того, какие именно уравнения были выбраны для расчетов. Рассмотрим специальные методы для решения переопределенной системы. Так основная идея метода наименьших квадратов заключается в минимизации отклонения между левой и правой частями системы [16]:

$$X_{\text{МНК}} = (A^T A)^{-1} A^T b,$$

где A – матрица коэффициентов системы, A^T – транспонированная матрица, b – вектор измеренных значений, $X_{\text{МНК}}$ – вектор координат смещения, полученный с помощью МНК.

Метод QR-разложения решает переопределенные системы уравнений на основе разложения матрицы изменения координат на произведение ортогональной и верхнетреугольной матриц [17]:

$$X_{QR} = R^{-1} Q^T b,$$

где Q – ортогональная матрица; R – верхнетреугольная матрица; b – вектор измеренных значений; X_{QR} – вектор координат смещения, полученный методом QR-разложения.

Для получения решения переопределенной системы методом псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза вычисляется произведение псевдообратной матрицы коэффициентов на вектор измеренных значений [18]:

$$X_{\text{ПСМП}} = A^{+}b,$$

где A^{+} – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза; b – вектор измеренных значений; $X_{\text{ПСМП}}$ – вектор координат смещения, полученный с помощью метода псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза.

Результаты

Результаты моделирования в программе Mathcad представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты погрешности измерения смещений и поворотов

Методы решения	Погрешность измерения смещения, мм		Погрешность измерения поворота, рад		
	dx	*dy*	θ_1	θ_2	θ_3
Выбор уравнений 1	0,030	0,115	12,179	10,750	0,005
Выбор уравнений 2	0,138	0,061	5,512	6,942	0,004
МНК	0,034	0,026	2,273	3,583	0,002
QR-разложение	0,034	0,026	2,273	3,583	0,002
Псевдообратная матрица Мура-Пенроуза	0,034	0,026	2,273	3,583	0,002

Обсуждение

Данные, полученные в результате математического моделирования для трехточечной системы, показывают, что использование всей переопределенной системы показывает меньшие значения погрешности, чем при выборе только определенного числа уравнений. Так как принцип работы докового прогибомера аналогичен трехточечной системе, можно считать, что полученные данные можно использовать для уменьшения погрешности и при дальнейшем анализе работы прибора. Стоит отметить большую погрешность для углов поворота θ_1 и θ_2. Данные параметры фактически не используются при анализе смещения и работе прогибомера.

Заключение

В результате исследования были проведены математическое моделирование и сравнительный анализ методов для решения переопределенных систем уравнений, возникающих при работе оптико-электронных систем. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что использование метода выбора лишь части уравнений показывает себя нестабильно и сильно зависит от того, какие уравнения были использованы в сокращенной системе. При этом, исходя из результатов моделирования в системе Mathcad, видно, что даже малое изменение погрешности измерения координат изображения влечет за собой кардинально разные эффективные выборы уравнений, и нет строго определенных уравнений, которые можно выкинуть и получить минимальную погрешность измерения смещения

координат. При этом МНК, QR-разложение и псевдообратная матрица Мура-Пенроуза показывают одинаковый и стабильный результат, который по точности превосходит метод выбора уравнений. В дальнейшем планируется сделать модель для всех измерительных каналов докового прогибомера и найти метод, дающий минимально возможную погрешность значений смещения координат. Также планируется рассмотреть и иные методы для решения переопределенных систем, кроме тех, что уже были разобраны в этой статье.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yang G., Liang H., Wu C. Deflection and inclination measuring system for floating dock based on wireless networks // Ocean Engineering. 2013. Vol. 69. P. 1–8.

2. Алеев А. М., Горбачев А. А., Коротаев В. В., Пантюшин А. В. Экспериментальное исследование случайной погрешности оптико-электронного докового прогибомера / Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2011, № 4 (74).

3. Korotaev V. V., Konyakhin I. A., Timofeev A. N., Yaryshev S. N. High precision multimatrix optic-electronic modules for distributed measuring systems // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7544. Art. 75441E.

4. Korotaev V. V., Timofeev A. N., Gorbachev A. A., Pantyushin A. V. Apparatus for controlling deformations of elongated object // RU Patent 2445572. 2012.

5. TSAL6200. High Power Infrared Emitting Diode, 940 nm, GaAlAs / GaAs : target data sheet / Vishay Semiconductors. – Rev. 2.1, 23-Jul-2021. – 6 p. – URL: https://www.vishay.com/docs/81010/tsal6200.pdf (дата обращения: 15.05.2026).

6. Korotaev V. V., Pantiushin A. V., Serikova M. G., Anisimov A. G. Deflection measuring system for floating dry docks // Ocean Engineering. 2016. Vol. 117. P. 39–44. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.012.

7. Михеев С. В., Усик А. А., Кулешова Е. Н. Многоканальная оптико-электронная система контроля деформаций сооружений / С. В. Михеев, А. А. Усик, Е. Н. Кулешова. – Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2011, № 4 (74).

8. Апенко М. И. и др. Оптические приборы в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение, 1974.

9. Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. М.: Недра, 1991. 224 с

10. Тургалиева Татьяна Валерьевна, Коняхин Игорь Алексеевич (2012). Исследование автоколлимационной системы измерения угловых деформаций крупногабаритных объектов. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, (6 (82)), 150–151.

11. Konyakhin I. A., Kleshchenok M. A. Monitoring deformations of industrial objects using optical-electronic autoreflection system [Электронный ресурс] / I. A. Konyakhin, M. A. Kleshchenok. – Proceedings Volume 9525, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX; 95251W. – SPIE Optical Metrology, Munich, Germany, 2015. – URL: https://doi.org/10.1117/12.2183604.

12. Sergey V. Mikheev, Igor A. Konyakhin, and Oleg A. Barsukov «Optical-electronic system for real-time position control of roof's supporting structure», Proc. SPIE 9525, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, 952542 (22 June 2015); https://doi.org/10.1117/12.2184837.

13. Анализ устойчивости решений систем линейных алгебраических уравнений: Учебное пособие. – М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ имени М.В. Ломоносова (лицензия ИД N 05899 от 24.09.2001 г.); МАКС Пресс, 2008. – 71 с. ISBN 978-5-89407-329-3 ISBN 978-5-317-02592-2.

14. Гантмахер , Ф. Р . Теория матриц : учебное пособие / Ф . Р . Гантмахер . ─ 5-е изд. ─ Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. ─ 560 с . – ISBN 978-5-9221-0524-8.

15. Новиков А. И. Решение переопределенных систем линейных алгебраических уравнений в задачах обработки сигналов и изображений // DSPA. ─ 2017. ─ № 3. ─ С. 45–52.

16. Прокуратова О. Н., Неклюдова С. А. Метод наименьших квадратов // Наука и современность. – 2014. – №28.

17. Шевцов Г. С., Крюкова О. Г., Мызникова Б. И. / Численные методы линейной алгебры: Учебное пособие. 2е изд., испр. и доп. ─ СПб.: Издательство «Лань», 2011. ─ 496 с.

18. Medici, P. Fundamentals of Computer Vision Analysis : textbook / P. Medici ; Department of Information Engineering, University of Parma. – Parma : University of Parma, 2015. – 184 p. – URL: https://www.ce.unipr.it/~medici/geometry.pdf (дата обращения: 15.05.2026).

© А. А. Лузанов, И. А. Коняхин, 2026

УДК 681.785.5
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-50-56

А. А. Сырбаков[1,2]✉, А. А. Дзюба[2], С. В. Додонов[2], И. А. Зарубин[1,2]

Применение эшелле-спектрометра для сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа

[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 разработан и собран светосильный эшелле-спектрометр высокого разрешения для сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа благородных металлов в порошках геологических проб. Оптическая схема спроектирована для регистрации пяти чувствительных линий благородных металлов: Au 242,795 нм, Au 267,595 нм, Ag 338,289 нм, Pt 265,945 нм и Pd 340,458 нм. Спектрометр обладает спектральным разрешением 3,3-6 пм, в зависимости от диапазона, что снижает вероятность спектральных наложений. При этом светосила спектрометра в 2-2,5 раза выше спектрометра Гранд-Поток. Данные характеристики должны положительно сказаться на аналитических свойствах прибора. Регистрация спектра осуществляется тремя быстродействующими линейками фотодиодов БЛПП-4000. При этом предусмотрена возможность замены линеек БЛПП-4000 на БЛПП-2000, что в случае со спектрометром «Гранд-Поток» обеспечило снижение пределов обнаружения в 7 раз.

Ключевые слова: эшелле-спектрометр, сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектрометрия, спектральный комплекс «Гранд-Поток», быстродействующий анализатор МАЭС

A. Syrbakov[1,2]✉, I. A. Zarubin[1,2], A. A. Dzuba[2], S. V. Dodonov[2]

Application of an echelle spectrometer for scintillation emission spectral analysis

[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, a high-transmission echelle spectrometer with high resolution for scintillation emission spectral analysis of noble metals in powdered geological samples was developed and assembled. The optical circuit is designed to register five sensitive lines of noble metals: Au 242.795 nm, Au 267.595 nm, Ag 338.289 nm, Pt 265.945 nm, and Pd 340.458 nm. The spectrometer has a spectral resolution of 3.3–6 pm, depending on the range, which reduces the possibility of spectral overlap. At the same time, the spectrometer's light transmission is 2–2.5 times higher than the Grand-Potok spectrometer. These characteristics should improve the analytical characteristics of the instrument. The spectrum is recorded using three high-speed BLPP-4000 photodiode arrays. The system allows for the replacement of the BLPP-4000 arrays with BLPP-2000 arrays, which, in the case of the Grand-Potok spectrometer, resulted in seven times lower detection limits.

Keywords: Echelle spectrometer, scintillation atomic emission spectrometry, Grand, high-speed MAES

Введение

За последнее десятилетие в области геологоразведочных работ благородных металлов (БМ) большое распространение получил метод сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектрометрии (САЭС). Данный метод характеризуется высокой чувствительностью, экспрессностью и низкой себестоимостью, поскольку не требует растворения проб и отделения БМ от макрокомпонентов пробы [1]. Сущность метода заключается в регистрации вспышек интенсивности спектральных линий элементов, возникающих при непрерывном поступлении отдельных частиц пробы в плазму [2]. Метод САЭС особо эффективен при определении элементов, присутствующих в пробе в виде включений, что характерно именно для благородных металлов. Для спектрометра «Гранд-Поток» производства компании ООО «ВМК-Оптоэлектроника» с линейками фотодиодов БЛПП-4000 и БЛПП-2000 пределы обнаружения благородных металлов составляют 0,7 мг/т и 0,1 мг/т соответственно [3]. Дальнейшее совершенствование метода САЭС может быть обеспечено за счет увеличения отношения сигнал/шум, что, в свою очередь, достижимо путем улучшения параметров твердотельных детекторов излучения (ТДИ) [4] и оптических характеристик спектрометра, в частности светосилы и спектрального разрешения [5]. Если ТДИ ограничены технологией производства, то оптические характеристики можно улучшить, выбрав более оптимальную схему для определенной задачи. В спектрометре «Гранд-Поток», предназначенном для многоэлементного атомно-эмиссионного анализа, применяется схема Пашена-Рунге с неклассической вогнутой дифракционной решеткой, обеспечивающая широкий спектральный диапазон (190–470 нм) и спектральное разрешение 7 пм [6]. Однако для определения низких содержаний БМ используют наиболее чувствительные спектральные линии: Au 267,595 нм, Ag 338,289 нм, Pt 265,945 нм и Pd 340,458 нм [7], что делает перспективной схему эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией для анализа методом САЭС. При разработке данной оптической схемы возможно объединение следующих характеристик: высокая разрешающая способность, светосила, термостабильность и компактные габариты [8]. Спектр, формируемый в данной схеме, представляет собой эшеллеграмму – совокупность пространственно разнесенных дифракционных порядков. Для регистрации такого спектра в современных приборах (Thermo iCAP, PerkinElmer Avio и т.д.) зачастую используют ПЗС-матрицы [9]. Специфика САЭС предъявляет жесткие требования к временному разрешению регистрирующей системы. Фотодиодные матрицы непригодны для данной задачи, поскольку их минимальное время экспозиции, как правило, превышает 20 мс. В противоположность им, линейки фотодиодов обладают на порядок лучшим быстродействием: используемая сборка линеек фотодиодов БЛПП-4000 допускает установку базовой экспозиции от 0,9 мс [10]. В связи с этим предлагается использование линеек фотодиодов для регистрации спектра. Применение схемы эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией снижает габариты прибора, повышает его аналитические характеристики и снижает стоимость производства.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное определение спектральных характеристик эшелле-спектрометра высокого разрешения.

Теоретическая часть

Оптическая схема эшелле-спектрометров (рис. 1) основана на вертикальной или горизонтальной схеме Черни-Тернера [11]. Основным диспергирующим элементом в схеме является эшелле-решетка, работающая в высоких дифракционных порядках спектра, за счет чего достигается высокая разрешающая способность. Использование множества дифракционных порядков приводит к многочисленным спектральным наложениям, для чего в схему добавляют дополнительный элемент, дисперсия которого перпендикулярно-ориентирована направлению дифракции решетки. В результате дифракционные порядки расходятся, исключая спектральные наложения.

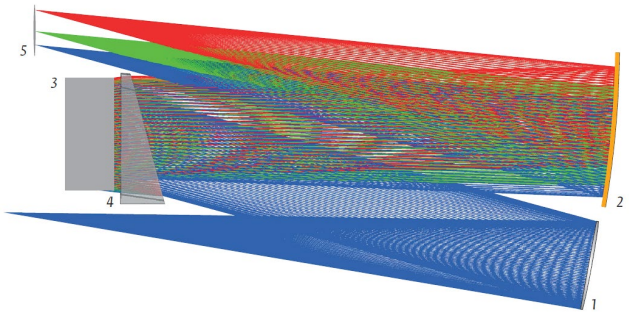


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра со скрещенной дисперсией:
1, 2 – вогнутые зеркала, 3 – эшелле-решетка, 4 – призма, 5 – детектор

Разработка оптической схемы

При определении спектрального разрешения спектрометра особое внимание было уделено линиям золота 242,795 нм и 267,595 нм. Данные линии подвержены спектральным наложениям, устранение которых требует разрешения не хуже 4 пм [3], что и было заложено в требования к прибору.

Таблица 1. Технические требования к эшелле-спектрометру для САЭС

Параметр	Значение
Относительное отверстие	>1/7
Регистрируемые спектральные линии	Au 242,795 нм Au 267,595 нм Pt 265,945 нм Ag 338,289 нм Pd 340,458 нм
Спектральное разрешение, пм	< 4
Фокусное расстояние, мм	< 400

В качестве основного диспергирующего элемента выбрана эшелле-решетка со следующими параметрами: N = 150 мм$^{-1}$, угол блеска: 60º. Элементом

скрещенной дисперсии служит призма из кварцевого стекла КУ-1, обладающая высокой дисперсией в требуемом спектральном диапазоне. Применение данного материала, в отличие от фторидов, позволило уменьшить габариты призмы и снизить потери излучения на переотражении и сокращенном оптическом пути в материале. Регистрация спектра осуществляется тремя линейками фотодиодов БЛПП-4000. На основе выбранных компонентов разработана и оптимизирована модель оптической схемы в среде Zemax. Итоговые параметры спроектированной оптической схемы спектрометра представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры оптической схемы эшелле-спектрометра для САЭС

Параметр	Значение
Материал призмы	КУ-1
Рабочий угол призмы, градусы	40
Детектор	3 × БЛПП-4000
Размер пикселя, мкм	7 × 200
Относительное отверстие	1/6,9
Параметры эшелле-решетки: N, мм$^{-1}$ Угол блеска, градусы	 150 60
Спектральное разрешение, пм	242,8 нм – 3 пм 267,6 нм – 3 пм 338,3 нм – 4 пм
Размер щели, мкм	15 × 1000

Спектральное разрешение модели разработанной схемы в рабочем спектральном диапазоне представлено на рис. 2.

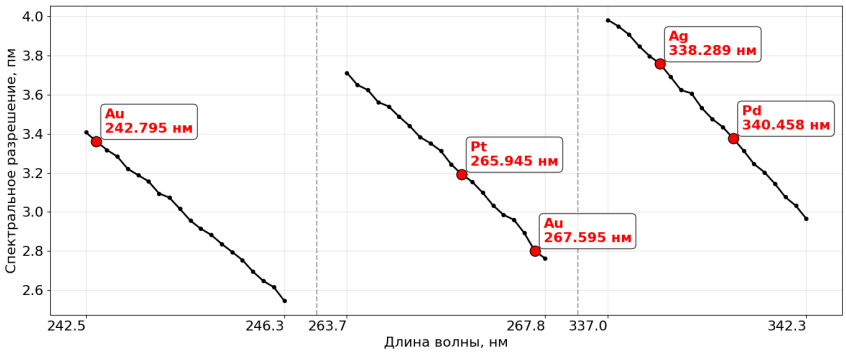


Рис. 2. Спектральное разрешение модели оптической схемы эшелле-спектрометра для САЭС

Экспериментальная часть

В качестве источника возбуждения спектров (ИВС) использовалась электродуговая установка для анализа порошковых проб методом просыпки вдувания «Поток» (ООО «ВМК-Оптоэлектроника»). Для повышения эффективности

использования излучения аналитической зоны в ПО «Zemax» была оптимизирована двухлинзовая осветительная система. Первая линза формирует промежуточное изображение плазмы с линейным увеличением 1:3,5, что позволяет вырезать участок дугового разряда диаметром 2 мм, в отличие от стандартной осветительной системы спектрометра «Гранд-Поток», которая обеспечивает выделение области диаметром 3 мм. Сужение наблюдаемой области дугового разряда позволяет убрать из регистрируемого сигнала часть фонового излучения, идущего от краевых участков. Подавление фонового излучения увеличивает контрастность регистрируемых сцинтилляционных пиков, что выражается в повышении отношения сигнал/шум.

Общий вид экспериментальной установки, включающей ИВС «Поток», блок осветительной системы и эшелле-спектрометр, приведен на фотографии (рис. 3).

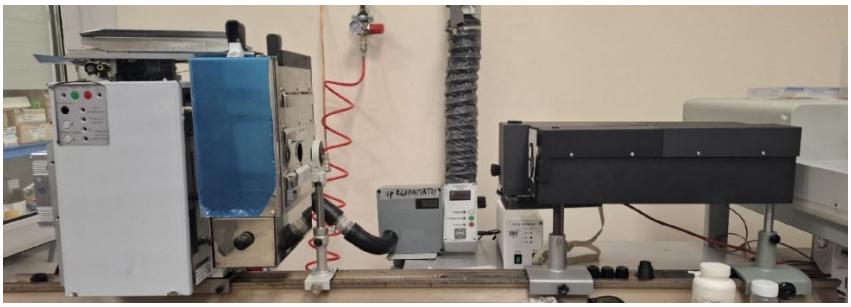


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки

Разработанный спектральный прибор обладает следующими параметрами: обратная линейная дисперсия в рабочих спектральных диапазонах составляет 0,13, 0,14 и 0,18 нм/мм для спектральных диапазонов 242,5–246,5 нм, 263,7–268 нм и 328–333,2 нм соответственно, и спектральное разрешение – 3,3–4,5 пм, 3,3–4,1 пм и 4–6 пм. Одновременная регистрация трех спектральных диапазонов позволяет определять золото, серебро и платину.

По сравнению со спектрометром «Гранд-Поток», разработанный прибор обладает в 2–2,5 раза большей светосилой (рис. 4) и высоким разрешением при значительно меньших габаритах, что видно из табл. 3.

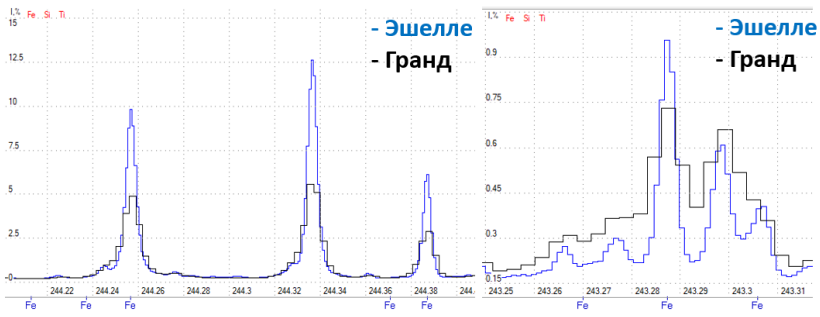


Рис. 4. Участок спектра в области 243–244 нм, зарегистрированный на эшелле-спектрометре и спектрометре «Гранд-Поток»

Заключение

В результате проведенной работы был разработан светосильный эшелле-спектрометр высокого разрешения. Спектральное разрешение и светосила собранного макета существенно превосходят аналогичные параметры спектрометра «Гранд-Поток». Данное преимущество должно оказать положительное влияние на аналитические свойства прибора при определении благородных металлов. Кроме того, высокое спектральное разрешение позволяет использовать спектральную линию золота Au 242,795 нм, применение которой на спектрометре «Гранд-Поток» ранее было невозможно вследствие спектральных наложений. В конструкцию прибора также заложена техническая возможность замены линеек фотодиодов БЛПП-4000 на БЛПП-2000. В случае со спектрометром «Гранд-Поток» реализация аналогичного решения обеспечивала снижение пределов обнаружения в 7 раз.

Таблица 3. Сравнение параметров спектрометров

Параметр	Эшелле-спектрометр	«Гранд-Поток»
Спектральное разрешение, пм	3,3 – 4,5 пм (242,5 – 246,5 нм); 3,3 – 4,1 пм (263,7 – 268 нм); 4 – 6 пм (328,0 – 333,2 нм)	7 пм
Светосила (отн. ед.)	2–2,5	1
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	0,15 – 0,21	0,4
Фокусное расстояние, м	0,3	1
Спектральный диапазон, нм	242,5 – 246,5 263,7 – 268 328 – 333,2	190-350 385-470
Габариты полихроматора, см (Ш х Г х В)	470 х 280 х 130	1130 х 810 х 200

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильева И. Е. и др. Методика определения содержания золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением //Аналитика и контроль. – 2010. № – 4. – 2010. – С. 201–213.

2. Шабанова Е. В. и др. Оценка размера частиц золота и серебра в геологических образцах с использованием сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа с высоким временным разрешением //Аналитика и контроль. – 2010. – № 4. – 2010. – С. 186–200.

3. 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.

4. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Бабин С. А. Оптимизация базовой экспозиции твердотельного детектора излучения в сцинтилляционном атомно-эмиссионном спектральном анализе //Аналитика и контроль. – 2015. – Т. 19. – №. 1. – С. 6–12.

5. Дзюба А. А., Додонов С. В., Лабусов В. А. Аналитические возможности спектрометра высокого разрешения «Гранд-2000» в дуговом атомно-эмиссионном анализе //Аналитика и контроль. – 2021. – Т. 25. – №. 4. – С. 331–339.

6. Лабусов В. А., Бехтерев А. В., Гаранин В. Г. Спектрометры с анализаторами МАЭС на основе новых линеек фотодетекторов //Аналитика и контроль. – 2021. – Т. 25. – №. 4. – С. 262–272.

7. Васильева И. Е. и др. Благородные металлы в образцах черных сланцев золоторудного месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) по данным метода сцинтилляционной дуговой атомно-эмиссионной спектрометрии. – 2018.

8. Сырбаков А. А. и др. Согласование параметров эшелле-решетки с размерами фото-приемной матрицы.

9. 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.

10. Бабин С. А., Селюнин Д. О., Лабусов В. А. Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов БЛПП-2000 и БЛПП-4000 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – № 1 (II). – С. 96–102.

11. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Машиностроение, 1975.

© А. А. Сырбаков, А. А. Дзюба, С. В. Додонов, И. А. Зарубин, 2026

УДК 535.417: 535.421
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-57-65

А. Л. Пазоев[1]✉

Увеличение производительности алгоритма вычисления интегральных преобразований методом ограничения многомерного пространства допустимых решений

[1]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pazoev-al2018@sgugit.ru

Аннотация. Предложено двухэтапное решение задачи синтеза цифровых голограмм, на первом этапе которого отсеивается область недопустимых значений параметров, определяемая физическими запретами и технологическими особенностями схемы записи голограмм (решается многопараметрическая задача), а на втором производится фактический расчет. Это позволило существенно упростить расчеты и скорость их выполнения. Решение многопараметрической задачи позволяет оптимизировать требуемые расчеты и прогнозировать характеристики синтезируемых цифровых голограмм и восстановленных ими 3D-объектов, а также проводить оценку их искажений.

Ключевые слова: голография, цифровая голография, компьютерная голограмма, голографические преобразования

A. L. Pazoev[1]✉

Increasing the performance of the algorithm for calculating integral transformations by limiting the multidimensional space of acceptable solutions

[1]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pazoev-al2018@sgugit.ru

Abstract. A two-stage solution to the problem of digital hologram synthesis is proposed, at the first stage of which the range of unacceptable parameter values determined by physical prohibitions and technological features of the hologram recording scheme is eliminated (a multiparametric problem is solved), and at the second stage the actual calculation is performed. This significantly simplified the calculations and the speed of their execution. Solving the multiparametric problem allows optimizing the required calculations and predicting the characteristics of synthesized digital holograms and 3D objects restored by them, as well as evaluating their deformations.

Keywords: holography, digital holography, computer hologram, holographic transformations

Введение

Целью работы является увеличение производительности при синтезе компьютерных голограмм методом ограничения многомерного пространства допустимых решений (решение многопараметрической задачи), что позволяет прогнозировать характеристики синтезируемых цифровых голограмм и оптимизировать их расчет и восстановление ими записанных на голограмме объектов.

В перспективе алгоритм позволит также проводить оценку искажений восстановленных изображений.

Методы и методики

Без ограничения общности, синтез цифровых голограмм можно представить в схеме Лейта и Упатниекса (рис. 1).

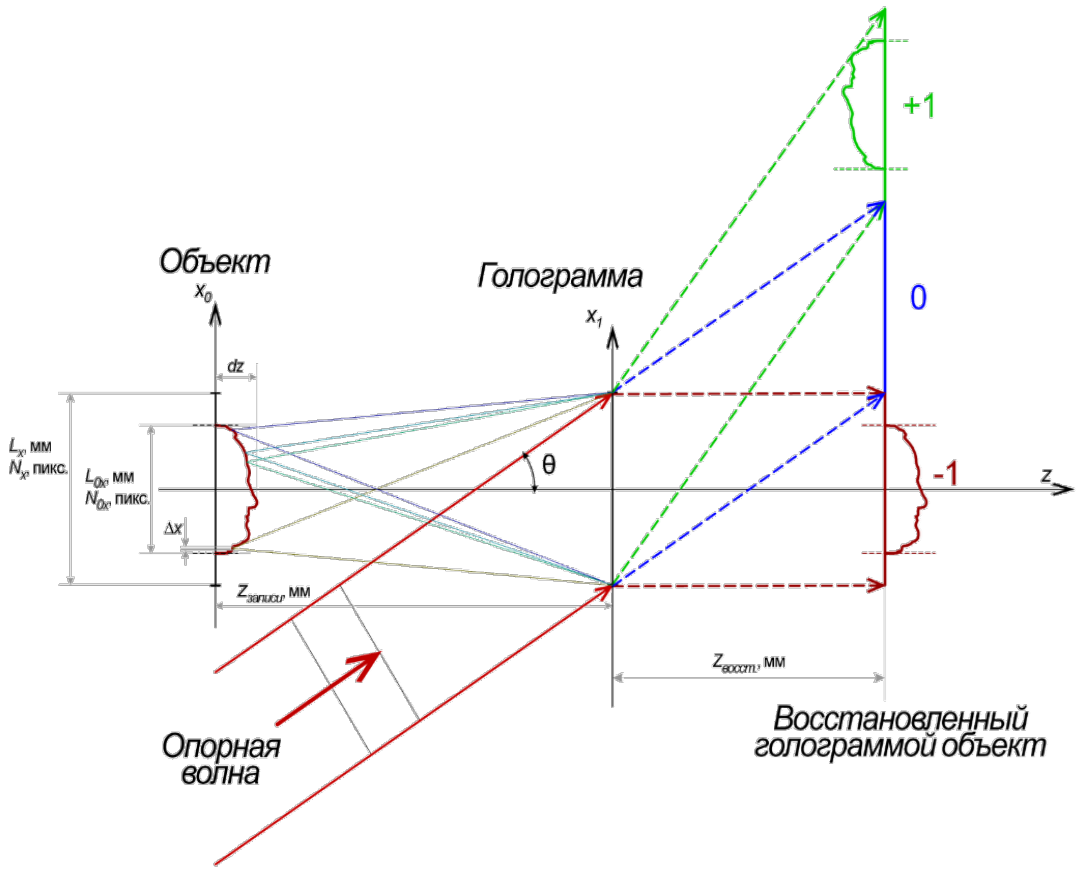


Рис. 1. Схема записи восстановления голограмм Лейта и Упатниекса:
L_{0x}, L_{0y} – габаритные размеры объекта; dz – глубина объекта;
L_x, L_y – габаритные размеры поля вокруг объекта; Δx, Δy – габаритные размеры пикселя объекта; θ – угол падения опорной волны;
$z_{\text{записи}}$ – расстояние от объекта до голограммы; $z_{\text{восст.}}$ – расстояние от голограммы до места восстановления объекта

В схеме (рис. 1) объектный пучок формируется объектом, находящимся на расстоянии $z_{\text{записи}}$ от плоскости регистрации голограммы. На ней комплексная амплитуда электромагнитного светового поля, описывающаяся интегральными преобразованиями от записываемого объекта, складывается с опорной волной. При освещении голограммы восстанавливающей волной, в простейшем случае равной опорной, при которой записывалась эта голограмма, восстанавливаются три расходящихся порядка дифракции. Вблизи самой голограммы все порядки наложены друг на друга, но по мере отдаления от голограммы порядки расходятся. Центральный (нулевой)

порядок – это прошедший непродифрагировавший на голограмме свет, минус первый порядок является восстановленным голограммой изображением объекта голографирования, а плюс первый – комплексно-сопряженным изображением.

3D-объект, а также рассеянная им световая волна (объектная) описывается двумя собственными 2D-функциями – текстурой поверхности и картой высот, которые кодируются, соответственно, амплитудой и фазой волны. В общем виде такая комплексная амплитуда описывается волновыми уравнениями. В численном представлении комплексная амплитуда объектной волны представима двумерной матрицей (1). Аналогично, опорная волна представима в виде матрицы (2).

$$A(x_1, y_1) = a_0(x_1, y_1) \cdot \exp\left(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \varphi_a(x_1, y_1)\right), \quad (1)$$

$$R(x_1, y_1) = r_0(x_1, y_1) \cdot \exp\left(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \varphi_r(x_1, y_1)\right), \quad (2)$$

где $a_0(x_1,y_1)$ – амплитуда объектной волны, $r_0(x_1,y_1)$ – амплитуда опорной волны, $\varphi_a(x_1,y_1)$ – фаза объектной волны, $\varphi_r(x_1,y_1)$ – фаза опорной волны.

Процессы синтеза и восстановления цифровых голограмм основываются на приближении скалярной теории дифракции, описывающей распространение электромагнитного поля в пространстве: двумерные интегральные преобразования [1] Рэлея – Зоммерфельда

$$U_1(x_1, y_1, z_1) = \int_{x_0}\int_{y_0}\left[U_0(x_0, y_0, z_0) \cdot \frac{\exp\left(i \cdot k_{\lambda зап.} \cdot r(x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1)\right)}{r(x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1)} \cdot \cos\left(\vec{n}, \vec{r}\right)\right] dx_0 dy_0 , \quad (3)$$

или Френеля

$$U_1(x_1, y_1) = \int_{x_0}\int_{y_0}\left[U_0(x_0, y_0) \cdot \exp\left(\frac{i \cdot k_\lambda}{2 \cdot z} \cdot \left((x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2\right)\right)\right] dx_0 dy_0 , \quad (4)$$

где, x_0, y_0, z_0 – координаты точек объекта; x_1,y_1,z_1 – координаты точек в плоскости записи голограммы; $k_{\lambda зап.}$ – волновое число; $r(x_0,y_0,z_0,x_1,y_1,z_1)$ – расстояние между каждой точкой (x_0,y_0,z_0) объекта и (x_1,y_1,z_1) точкой на голограмме:

$$r(x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1) = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} ; \quad (5)$$

$\cos(n,r)$ – косинус угла между вектором от каждой точки на объекте к каждой точке голограммы [(x_0,y_0) и (x_1,y_1)] и оптической осью. При малых углах этот косинус приближенно равен 1:

$$\cos\left(\vec{n}, \vec{r}\right) = \frac{\vec{n} \cdot \vec{r}}{\left|\vec{n}\right| \cdot \left|\vec{r}\right|} = \frac{n_x \cdot r_x + n_y \cdot r_y + n_z \cdot r_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \cdot \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}} \approx 1 . \quad (6)$$

Одновременно с объектной волной на плоскость записи голограммы посылается опорная волна (R) под определенным углом ($\theta_{зап.}$). Опорная волна в простейшем случае представлена плоским волновым фронтом.

В результате интерференции объектной и опорной волн в плоскости записи голограммы образуется интерференционная картина, называемая голограммой [2]:

$$Hol(x_1, y_1) = \left| A(x_1, y_1) + R(x_1, y_1) \right|^2, \quad (7)$$

где $Hol\,(x_1,y_1)$ – интерференционная голографическая структура.

При переходе к цифровому синтезу голограмм интегральные преобразования представляются в дискретной форме, т. е. интегрирование по бесконечно малым отрезкам переходит в суммирование по отрезкам конечного размера, а сами координаты (x,y,z) получают соответствующие индексы.

Объектная волна вычисляется в плоскости записи голограммы, в дискретном виде она представляет собой прямоугольную матрицу с размерностью равной размерности голограммы, для ее описания потребуется два индекса: для пересчета координат по осям x_1 и y_1 – n_1 и m_1 соответственно. А координата по оси z, хранится в соответствующей ячейке (x_1^{n1},y_1^{n1}) матрицы и зависит от обоих индексов – $z_1^{n1,m1}$. В таком случае, интеграл Рэлея–Зоммерфельда (3) имеет следующий вид:

$$U_1\left(x_1^{n1}, y_1^{m1}, z_1^{n1,m1}\right) = \sum_{x_0}\sum_{y_0}\left\{U_0\left(x_0^{n0}, y_0^{m0}, z_0^{n0,m0}\right)\frac{\exp\left(i\cdot k_{\lambda зап.}\cdot r\left(x_0^{n0}, y_0^{m0}, x_1^{n1}, y_1^{m1}, z_0^{n0,m0}, z_1^{n1,m1}\right)\right)}{r\left(x_0^{n0}, y_0^{m0}, x_1^{n1}, y_1^{m1}, z_0^{n0,m0}, z_1^{n1,m1}\right)}\cos\left(\vec{n},\vec{r}\right)\right\} \quad (8)$$

где n_0, m_0 – порядковый номер точки в матрице карты высот объекта; n_1, m_1 – порядковый номер точки в матрице объектной волны.

А в интеграле Френеля (4) все расстояния z одинаковые, поэтому они не зависят от координат, и интеграл принимает следующий вид:

$$U_1\left(x_1^{n1}, y_1^{m1}\right) = \sum_{x_0}\sum_{y_0}\left\{U_0\left(x_0^{n0}, y_0^{m0}\right)\cdot\exp\left[\frac{i\cdot k_\lambda}{2\cdot z}\cdot\left(\left(x_1^{n1}-x_0^{n0}\right)^2+\left(y_1^{m1}-y_0^{m0}\right)^2\right)\right]\right\}. \quad (9)$$

При таком способе задания объекта точки по расположению в пространстве ограничены ячейками матрицы, что накладывает ограничения на величину допустимой окклюзии.

Вычисления по (8), (9) трудоемки, поскольку идет перебор комплексных значений ядер интегральных преобразований по четырем переменным, что сопровождается большими требованиями к вычислительным ресурсам. Синтез голограмм даже относительно небольших размеров занимает непозволительно долгое время [3]. Конечно, существуют способы ускоренного расчета дифракционной картины, но и они не лишены недостатков [4].

Физический размер голограммы ограничивает окно поля наблюдения объекта, чем шире/выше окно, тем больше информации через него можно увидеть. Но, чем больше размер голограммы, тем больше размер матрицы (8), (9). При условии, что сами точки остаются прежнего размера, это означает, что тем большее количество вычислительных ресурсов необходимо затратить для синтеза этой голограммы.

Размер дискретного участка на голограмме (точки/дискреты/пикселя), зависит от длины волны излучения, использованного во время ее синтеза как в объектной, так и в опорной волне. Для диапазона волн видимого света размер точки должен быть не более 0,3–0,8 мкм. Разложив, казалось бы, даже небольшой формат привычного бумажного листа А4 на такие дискретные участки размером 1 мкм, получаем массивы в миллионы раз превосходящие телевизионный стандарт [5].

Здесь появляются основные противоречия между требованиями теоремы отсчетов Котельникова (критерий Найквиста), которая требует для адекватного непрерывного сигнала не менее двух отсчетов на каждом периоде голографической дифракционной решетки и другими требованиями к голограмме.

Слишком большие массивы дискретных отсчетов, представляющих точки голограммы. Показано [3], что для 3D-объектов при любых величинах массивов обязательно существуют окраинные зоны объекта, где критерий Найквиста нарушается.

Следующее противоречие по критерию Найквиста возникает при увеличении угла падения опорной волны и для компенсации требует ухода в более коротковолновую область спектра, что бывает неприемлемо.

Также известно, что в схеме Лейта – Упатниекса (рис. 1) (а также в схеме Д. Габора) необходимо обеспечить пространственное разделение нулевого и минус первого порядка на расстоянии наблюдения восстановленного голограммой изображения. Это ограничивает снизу диапазон допустимых углов опорного пучка. А сверху его одновременно ограничивает тот же критерий Найквиста о необходимости соблюдать не менее двух отсчетов на один период решетки при увеличении несущей частоты.

Яркость видимых точек объекта должна обеспечить видность интерференционной картины не меньше, чем одна дискрета в представлении глубины цвета на интерференционной структуре голограммы.

Цифровое представление 3D-объекта требует искусственного удаления точек, невидимых из различных участков синтезируемой голограммы, обеспечивая эффект окклюзии при записи на ней 3D-объекта (рис. 2).

Плотность точек на поверхности голографируемого объекта должна быть достаточно густой, чтобы при восстановлении этих точек голограммой расстояние между ними было меньше разрешаемого глазом. Это обеспечивает зрительную непрозрачность поверхности восстановленного объекта.

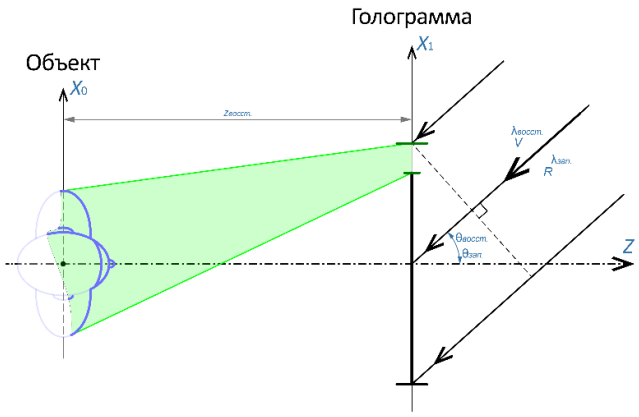


Рис. 2. Невидимая из определенного места на голограмме часть голографируемого объекта удаляется за ненадобностью

Другое противоречие при цифровом синтезе голограмм, наоборот, снимается. Дело в том, что при аналоговом синтезе голограмм минимально возможный угол падения опорной волны ограничивается таким образом, чтобы волна не виньетировалась объектом (т. е. объект ее не заслонял). При цифровом синтезе опорная волна может проходить сквозь объект.

Задача выбора пространства допустимых значений параметров усложняется тем, что некоторые связи могут быть нелинейными. Например, нелинейность фотоотклика при определении необходимых допусков на видность голографической решетки. К нелинейным процессам при синтезе голограммы также относятся искусственные изменения ее гистограммы, сделанные для увеличения контраста как самой голограммы, так и восстановленного ею изображения (рис. 3).

Задачу выбора пространства допустимых значений параметров можно показать на «многомерной» схеме, где все пространство – это поле всевозможных решений, оси ограничивают значения этих параметров, оставляя только пространство допустимых значений параметров (рис. 4).

Алгоритм синтеза голограммы и восстановления ею 3D-объекта можно разделить на несколько блоков (рис. 5).

Группа блоков 1–4 – подготовка и синтез голограммы. В блоке 1 происходит ограничение многомерного пространства допустимых решений, производится решение многопараметрической задачи. Ограничение многомерного пространства допустимых решений позволяет оптимизировать требуемые расчеты и прогнозировать характеристики синтезируемых цифровых голограмм и восстановленных ими 3D-объектов и тем самым увеличить производительность алгоритма синтеза голограмм. Блок 2 отвечает за подготовку объекта голографирования: загрузка данных о 3D объекте (из файла), настройка его размеров, положения в пространстве. В блоке 3 подготавливаются объектная и опорная волна. Блок можно разделить на подблоки: формирование комплексной амплитуды объектной и опорной волн (1), (2); расчет дифракционных изменений объектной волны, прошедшей определенной расстояние в пространстве, с помощью интегралов в дискретном виде (8), (9). В блоке 4 синтезируется голограмма (7).

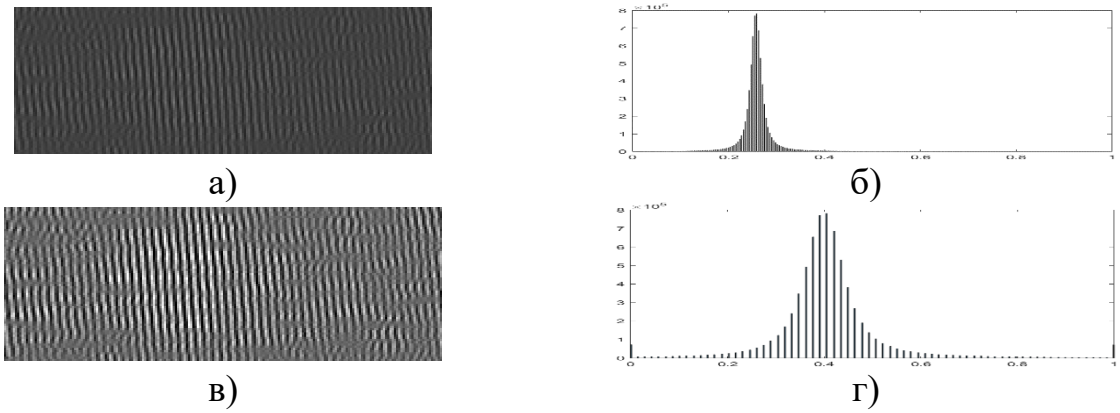


Рис. 3. Корректировка гистограммы синтезированной голограммы:
а) исходная голограмма; б) гистограмма исходной голограммы; в) голограмма с модифицированной гистограммой; г) модифицированная гистограмма

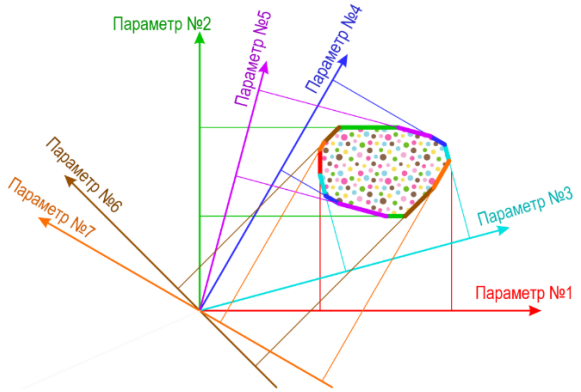


Рис. 4. Схема, поясняющая многопараметрическую задачу оганичения области допустимых значений в многомерном пространстве записи

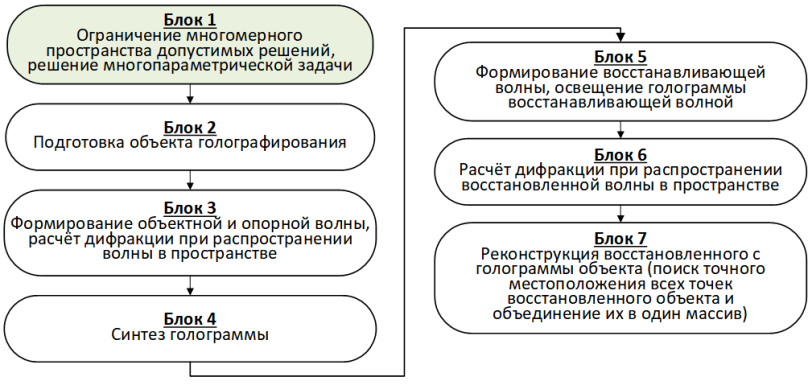


Рис. 5. Блок-схема алгоритма записи восстановления голограмм

Группа блоков 5–7 – восстановление голограммой 3D-объекта. Блок 5 отвечает за формирование восстанавливающей волны. В блоке 6 происходит расчет дифракционных изменений восстановленной волны, прошедшей определенной расстояние в пространстве. В блоке 7 анализируется рассчитанная в блоке 6 вос-

становленная волна, происходит определение местоположения восстановленных точек 3D объекта. По результатам поиска и анализа всех восстановленных точек объекта в единый массив собирается полный образ восстановленного 3D объекта, который можно сравнить с исходным.

По алгоритму из рис. 5 на базе MATLAB, с помощью дизайнера приложений MATLAB App Designer [6], разработана программа синтеза и восстановления голограмм. Все элементы окна программы сгруппированы. Основное окно программы с обозначениями групп показано на рис. 6.

С помощью этой программы (рис. 6) нами синтезируются цифровые голограммы различного назначения. Восстановленное одной из них изображение приведено на рис. 7.

Выводы

В результате использования разработанной программы были устранены расчеты голограмм с нарушением условий Найквиста и других характеристик, приведенных выше. При расчете особенно крупных голограмм на неспециализированных процессорах время вычислений иногда исчислялось сутками. При неправильно заданных исходных параметрах такая голограмма могла оказаться неработоспособной, о чем обычно становится известно только по окончании расчетов. С разработанной и кратко описанной выше программой такие случаи были исключены, что позволило эффективно вычислять множество сложных голограмм и оперативно получать результаты, труднопрогнозируемые аналитически. Предложенные методы прогнозирования характеристик синтезируемых цифровых голограмм и оптимизация их расчетов для качественного восстановления изображений объектов позволили существенно сократить время проведения численных экспериментов по записи и восстановлению компьютерных голограмм.

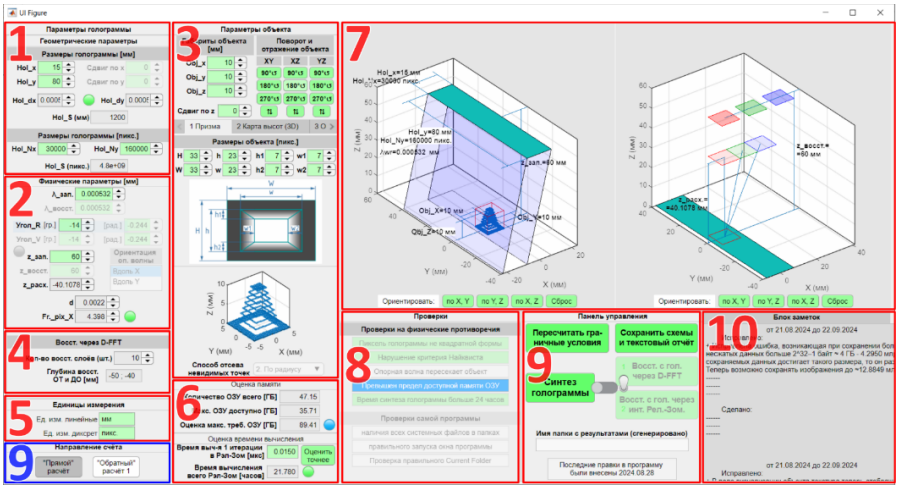
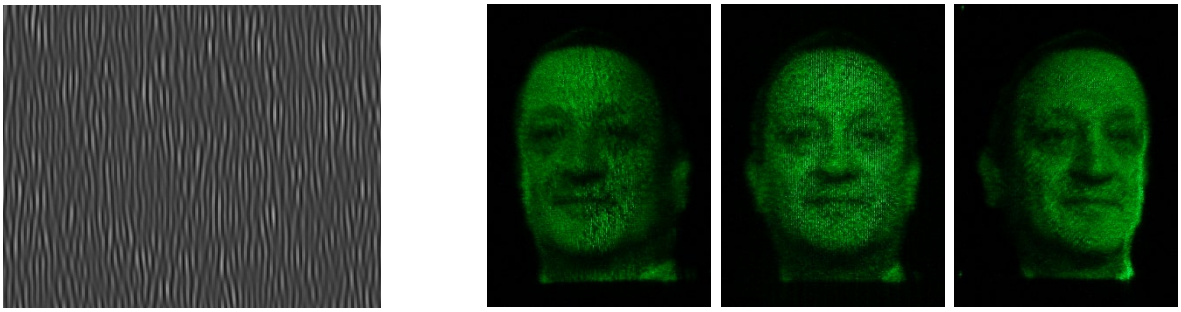


Рис. 6. Окно программы. Показано разделение элементов окна по группам: 1 – ввод размеров голограммы; 2 – ввод физических величин; 3 – ввод параметров 3D-объекта; 4 – настройка параметров восстановления голограммой 3D-объекта; 5 – настройка используемых единиц измерения; 6 – оценка требуемых вычислительных и временных ресурсов; 7 – область визуализации результатов вычислений; 8 – проверки на противоречия; 9 – кнопки панели управления; 10 – технические заметки



а) б)

Рис. 7. а) фрагмент синтезированной голограммы (24840×124800 точек); б) три ракурса восстановленного голограммой 3D-объекта

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
2. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного излучения [Текст] / Ю. Н. Денисюк. - ДАН СССР. – 1962. – Т. 44. – С. 1275.
3. Шойдин С. А. Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удаленного воспроизведения динамических объемных изображений // Дисс. на соискание ученой степени д.ф.-м.н. Новосибирск, 2023. 400 с.
4. Picart P. Digital Holography / P. Picart, J.-Ch. Li. – John Wiley & Sons, 2012. – 367 c. ISBN: 978-1-84821-344-9.
5. Shoydin S. A. Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – № 10. – P. 448–473. https://doi.org/10.3390/photonics8100448.
6. MATLAB App Designer – MATLAB & Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html.

© А. Л. Пазоев, 2026

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-66-70

А. М. Оборин[1]✉, К. С. Зубанов[1], С. В. Двойнишников[1]

Разработка программного модуля для обработки сигналов лазерных доплеровских анемометров

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

Аннотация. В рамках данный работы необходимо было разработать программный модуль для обработки сигналов лазерного доплеровского измерителя скорости, представляющего из себя прибор для бесконтактного измерения скорости частиц в газожидкостных потоках. Актуальность разрабатываемого программного модуля продиктована потребностью в прецизионном метрологическом обеспечении теплофизических, гидро- и аэродинамических экспериментов, не допускающем искажения исследуемых процессов.
Целью работы является разработка программного модуля для обработки сигналов лазерных доплеровских измерителей скорости. Обработка сигнала состоит из частотной фильтрации исходного сигнала, спектрального преобразования доплеровского сигнала и спектрального анализа для измерения скорости частицы в газожидкостных потоках. Алгоритмы оптимизированы для потоковой обработки в режиме реального времени, адаптированы к различным конфигурациям оптической схемы.

Ключевые слова: фильтрация сигнала, спектральное преобразование, спектральный анализ, лазерный доплеровский измеритель скорости, лазерный доплеровский анемометр

A. M. Oborin[1]✉, K. S. Zubanov[1], S. V. Dvoinishnikov[1]

Development of software module for processing signals from laser doppler anemometers

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

Abstract. As part of this work, it was necessary to develop a software module for processing signals from a laser Doppler velocity meter, a device designed for non-contact measurement of particle velocity in gas-liquid flows. The relevance of the software module being developed stems from the need for precise, high-accuracy metrological support for thermophysical, hydrodynamic, and aerodynamic experiments that does not allow for distortion of the processes under study.
The objective of this work is to develop a software module for processing signals from laser Doppler velocity meters. Signal processing consists of frequency filtering of the input signal, spectral transformation of the Doppler signal, and spectral analysis to measure particle velocity in gas-liquid flows. The algorithms are optimized for real-time streaming processing and adapted to various optical system configurations.

Keywords: signal filtering, spectral transformation, spectral analysis, laser Doppler velocity meter, laser Doppler anemometer

Введение

Потребность в прецизионных и надежных средствах измерения параметров газожидкостных потоков растет вместе с прогрессом науки и техники. Бескон-

тактное определение скорости частиц с высокой точностью и чувствительностью является одной из ключевых задач в теплофизике, гидро- и аэродинамике.

Существует два основных метода измерения скорости частиц в газожидкостном потоке: контактный и бесконтактный. При контактном способе определения скорости датчики помещаются в измеряемую среду, искажают гидродинамическую структуру и имеют ограниченную точность в области высоких скоростей. Бесконтактные методы, базирующиеся на лазерных и оптических эффектах, лишены указанных недостатков, они обеспечивают высокое пространственное и временное разрешение и рассматриваются в качестве предпочтительного инструмента для диагностики сложных течений.

Одним из наиболее эффективных бесконтактных методов является лазерный доплеровский измеритель скорости (ЛДИС). ЛДИС фотоприемником регистрирует сигнал лазерного излучения, рассеянного пролетающими частицами в исследуемом потоке. Такой подход позволяет проводить измерения с высокой точностью и чувствительностью, не искажая исследуемый процесс [1–3].

Современный ЛДИС представляет собой аппаратно-программный комплекс, включающий оптоэлектронный модуль (источник лазерного излучения, оптический тракт и фотоприемник), систему сбора данных и персональный компьютер со специализированным программным обеспечением, управляющим экспериментом и реализующим обработку сигналов ЛДИС.

Целью работы является создание программного модуля для обработки сигналов лазерных доплеровских анемометров. Для этого разрабатывалась архитектура системы, проводились исследования и сравнительный анализ алгоритмов обработки сигналов лазерных доплеровских анемометров и реализовывались алгоритмы частотной фильтрации, спектрального преобразования и спектрального анализа для выделения доплеровской частоты.

Структура измерительного комплекса

Формирование доплеровского сигнала определяется совокупностью оптических элементов измерительного модуля и типом используемого фотоприемника. Для возникновения устойчивой интерференционной картины необходимо разделить падающее лазерное излучение на два когерентных пучка.

Фотоприемник в лазерных доплеровских измерительных системах является важнейшим звеном во всей цепи. Фотоприемник регистрирует прохождение частиц через интерференционную картину в области перетяжки и формирует сигнал, который передается в систему сбора данных для дальнейшей его обработки.

Несмотря на многообразие аппаратных решений, структура сигнала на выходе фотоприемника сохраняет общие характерные черты. Рассеивающая частица, пересекающая интерференционную картину, порождает всплеск интенсивности, содержащий низкочастотный пьедестал и высокочастотную доплеровскую модуляцию. Именно эта инвариантность информативных признаков позволяет создавать универсальные алгоритмы обработки, не привязанные к параметрам конкретной оптической системы. Такие алгоритмы могут быть адаптированы к различным конфигурациям измерителей путем изменения небольшого

набора калибровочных констант, не требуя пересмотра программной архитектуры.

В состав лазерного доплеровского измерителя скорости входят оптоэлектронный модуль, аналого-цифровой преобразователь данных и персональный компьютер (ПК) со специализированным ПО (рис. 1).

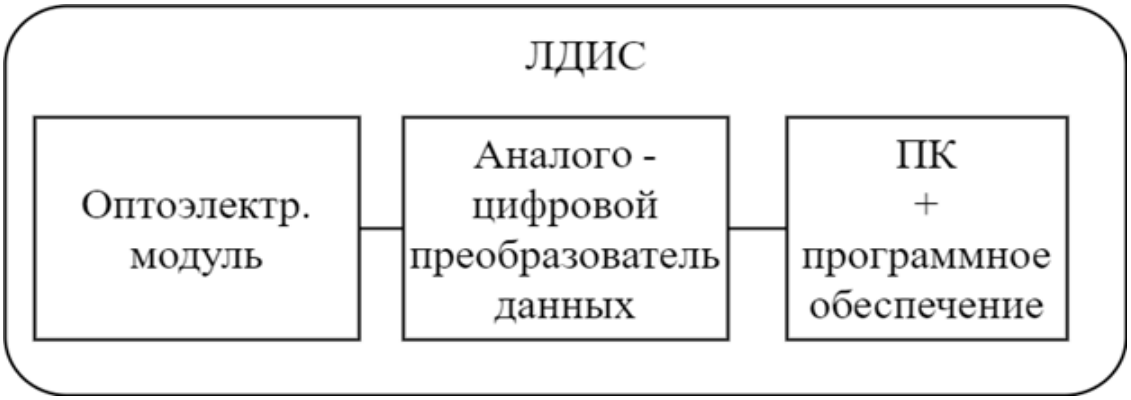


Рис. 1. Структура измерительного комплекса

Обмен информацией между системой сбора и ПК реализован пакетным способом, структура пакета позволяет передавать как одиночный доплеровский сигнал, так и несколько сигналов одновременно.

Внутренняя архитектура

Внутренняя архитектура спроектирована таким образом, что любой ее модуль может быть заменен без значительных изменений в коде программы. Каждый модуль в программном обеспечении работает в отдельном потоке для обеспечения максимальной производительности приложения. Взаимодействие между всеми модулями программы происходит через диспетчер с помощью каналов и многопоточной очереди.

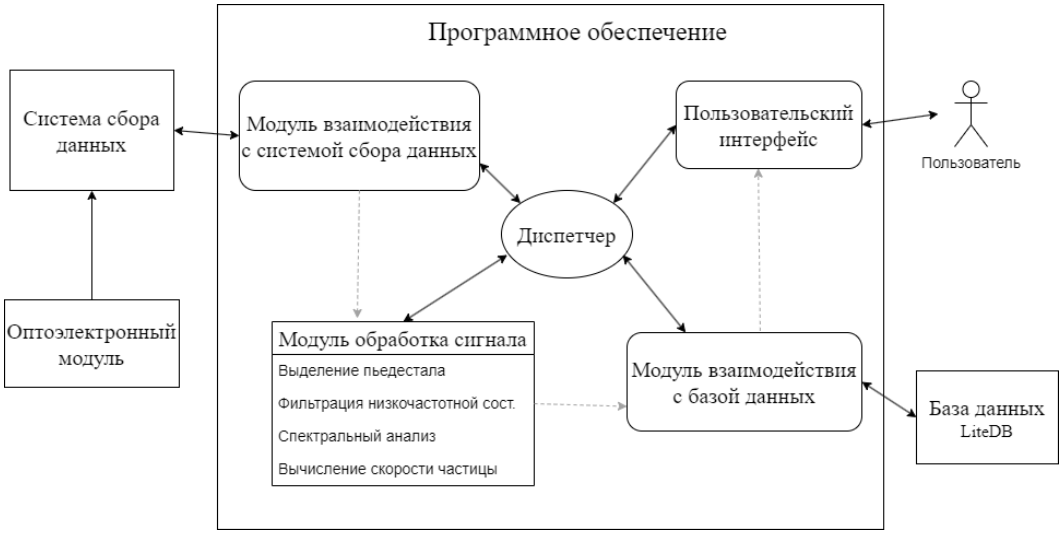


Рис. 2. Внутренняя архитектура программного модуля

Реализация алгоритмов обработки сигнала

Реализованы алгоритмы обработки входного сигнала с фотоприемника, они разбиты на несколько последовательных этапов. Каждый этап может быть реализован по-разному.

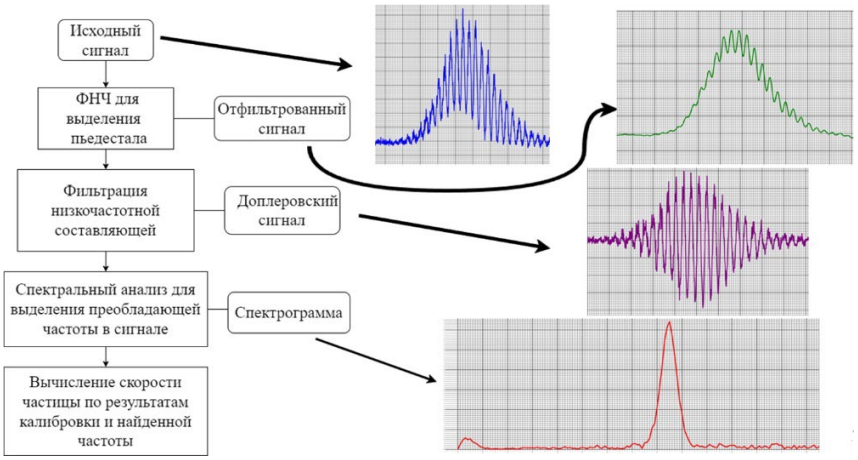


Рис. 3. Алгоритм обработки данных

Частотная фильтрация и выделение доплеровской составляющей

Первичная обработка направлена на удаление низкочастотного пьедестала, обусловленного изменением интенсивности излучения при пролете частицы через измерительный объем. В результате анализа существующих подходов (фильтры Баттерворта, Чебышева, скользящее среднее) был выбран метод скользящего среднего, обеспечивающий вычислительную эффективность при потоковой обработке в реальном времени. После получения пьедестала доплеровская составляющая выделяется путем вычитания отфильтрованного сигнала из исходного.

Корме того, в процессе обработки вычисляются амплитуды исходного и доплеровского сигналов, как разность между максимальными и минимальными значениями массива.

Спектральный анализ доплеровского сигнала

Выполняем быстрое преобразование Фурье (БПФ) для перехода к частотному представлению сигнала. Перед этим из сигнала удаляется постоянная составляющая, вычитанием среднего арифметического значения, что позволяет избежать доминирования нулевой гармоники в спектре и облегчает поиск доплеровского пика. Далее сохраняются первые N (N подбирается по исследуемому диапазону скоростей) гармоник для исключения высокочастотного шума.

Пик доплеровской частоты может быть меньше пика пьедестала, для этого гармоники с индексами от 1 до M умножаются на коэффициент $\sqrt{i}$ (где i – номер гармоники), а гармоники с индексами от M+1 до N – на фиксированный коэффициент. Это повышает надежность детектирования пика доплеровского сигнала, увеличивая вклад высокочастотных компонент. Далее необходимо нормализовать спектр сигнала на максимальное значение, что приводит амплитуду к диапазону [0,1].

Статический анализ для выделения доплеровской частоты и расчет скорости

На последнем этапе нужно найти доплеровскую частоту по спектрограмме. Для повышения точности детектирования доплеровской частоты используется метод параболической интерполяции пика: сначала находится индекс максимальной амплитуды спектра, затем по трем точкам (максимальной амплитуде и двум соседним точкам) строится парабола, находится ее пик. Это и будет доплеровская частота. Переход от частоты к скорости частицы осуществляется путем умножения частоты на калибровочный коэффициент оптической схемой измерителя.

Заключение

В ходе выполнения работы были разработаны универсальные алгоритмы обработки сигналов лазерного доплеровского измерителя скорости, обеспечивающие выделение полезной составляющей на фоне помех, определение доплеровской частоты и последующий расчет скорости частиц. Реализованные методы частотной фильтрации и спектрального анализа оптимизированы для работы в режиме реального времени и могут быть адаптированы под различные конфигурации измерительного оборудования.

На текущем этапе разработка велась для операционной системы Windows, однако архитектурные решения и выбор технологий позволяют в будущем обеспечить поддержку Linux без значительных изменений в кодовой базе.

Лазерный доплеровский анемометр позволяет измерять скорость частиц в газожидкостных потоках бесконтактным методом, не внося возмущений в исследуемую среду. Это позволяет применять систему в научных исследованиях по диагностике в таких областях, как энергетика, гидродинамика и авиастроение.

Дальнейшее развитие системы связано с расширением кроссплатформенной поддержки (поддержкой операционной системы Linux) и оптимизацией алгоритмов для повышения надежности измерений в условиях повышенных шумов и более широкого диапазона измерения скоростей.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 126021217041-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Севастьянова С. А. Региональное планирование развития туризма и гостиничного хозяйства : учеб. пособие. – М. : КНОРУС, 2007. – 256 с.

2. 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.

3. 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, 2026

УДК 528.71
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-71-77

А. Ю. Кравцова[1]✉, А. В. Трубин[1], Д. В. Литвинова[1], М. В. Кашкарова[1]

Исследование динамики капель ферридной суспензии в магнитном поле методами оптической диагностики

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

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование динамики капель ферридной суспензии на твердой поверхности под действием внешнего магнитного поля методами оптической диагностики. В эксперименте были рассмотрены деформации капли, и проведена оценка скорости ее движения в неоднородном магнитном поле. Магнитное поле создавалось с использованием неодимового магнита, магнитная индукция на поверхности которого сотавляет 506 мТл. Магнит располагался на различных расстояниях от капли ферридной суспензии, варьировался размер капли ферридной суспензии, а также ее вязкость. Для диагностики деформаций и движения капли использовалась видеофиксация с частотой съемки до 30 к/с. Камера фиксировалась на тринокулярную насадку микроскопа через C-mount адаптер, освещение производилось светодиодной лампой, расположенной под прямым углом к твердой поверхности. В результате исследований установлено критическое значение индукции магнитного поля, позволяющего приводить каплю в движение. Проведена оценка скорости движения капли. Показано, что с увеличением вязкости микронные ферромагнитные частицы внутри суспензии движутся медленнее, что приводит к увеличению порогового расстояния до магнита. Полученные результаты исследования широко применимы при изучении физических свойств магнитных жидкостей и в задачах управляемого перемещения веществ, в том числе в медицинских приложениях.

Ключевые слова: ферридная суспензия, динамика капель, магнитное поле, индукция магнитного поля, вязкость, визуализация

A. Y. Kravtsova[1]✉, A. V. Trubin[1], D. V. Litvinova[1], M. V. Kashkarova[1]

Study of the dynamics of ferride suspension droplets in a magnetic field using optical diagnostic methods

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

Abstract. An experimental study of the dynamics of ferride suspension droplets on the solid surface under the influence of magnetic field was carried out using optical diagnostics methods. The experiment examined droplet deformations and estimated the droplet velocity in a nonuniform magnetic field. The magnetic field was generated using a neodymium magnet; the magnetic induction on it's surface was 506 mT. The magnet was positioned at various distances from the ferride suspension droplet, and the droplet's size and viscosity were varied. Video recording at up to 30 fps was used to monitor the droplet's deformations and movement. The camera was attached to the microscope's trinocular head via a C-mount adapter and illumination was provided by an LED lamp positioned at a right angle to the solid surface. The study obtained the critical value of the magnetic field strength required to set the droplet in motion. The droplet velocity was estimated. It was shown that with increasing viscosity micronsized ferromagnetic particles within the suspension move more slowly

leading to an increase in the threshold distance to the magnet. The obtained results can be use in area of the physical properties of magnetic fluids and in controlled motion of substances including in medical applications.

Keywords: ferride suspension, droplet dynamics, magnetic field, viscosity, visualization

Введение

Магнитные суспензии, а именно, ферридные суспензии, представляют собой жидкости, свойства которых существенно изменяются под действием внешнего магнитного поля [1-2]. В настоящее время такие системы достаточно хорошо изучены в целом, однако динамика отдельных капель магнитной суспензии на твердых поверхностях, особенно с учетом влияния свойств поверхности и вязкости жидкости, исследована значительно меньше.

Известно, что движение магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле определяется взаимодействием магнитных, капиллярных и вязкостных сил, а также силами адгезии между каплей и поверхностью [3-5]. Магнитная сила стремится переместить каплю в сторону источника магнитного поля. Сила тяжести в рассматриваемых условиях в основном определяет прижатие капли к поверхности и слабо влияет на горизонтальное движение [5]. Существенную роль играет поверхностное натяжение, которое определяет форму капли и характер ее контакта с поверхностью [4].

Силы трения и адгезии зависят от свойств поверхности. На гладких поверхностях контакт капли с основанием менее выражен, что облегчает ее движение [5]. На матовых и шероховатых поверхностях возрастает сопротивление движению, что приводит к уменьшению скорости капли или полному подавлению ее перемещения при слабом магнитном воздействии [6]. Таким образом, динамика капли магнитной суспензии на поверхности определяется совместным влиянием магнитного поля, вязкости жидкости и свойств поверхности. Это делает экспериментальное исследование подобных систем особенно наглядным и информативным [7-9]. Для анализа физических механизмов, определяющих движение магнитных жидкостей широко используются бесконтактные методы диагностики [10-14].

Наиболее интересным методом диагностики деформаций капли ферридной суспензии является метод фазовой триангуляции [10-11]. Метод основан на адаптивной фильтрации и статистическом анализе распределения интенсивности в зарегистрированных фазовых изображениях. Метод позволяет исключать систематические искажения результатов измерений, используя статистическую фильтрацию данных для измерения трехмерного профиля объекта в условиях случайного аддитивного шума и ограниченного динамического диапазона фотоприемника. Зачастую в работах для диагностики процессов используется теневая визуализация, позволяющая проводить прямые наблюдения размеров, форм, динамики движения и др. [12-13]. Используя алгоритм обработки изображений с кодом Грея, можно анализировать трехмерную геометрию сложнопрофильных объектов [14], таких как капли. В связи с этим представляет интерес проведение

экспериментального исследования в лабораторных условиях с использованием различных магнитных суспензий.

В данной работе исследуется совместное влияние поверхности и вязкости магнитной суспензии на динамику движения ферридной капли под действием магнитного поля. Эксперимент проводился с применением методов оптической диагностики, что позволило оценить динамические параметры движения капли при различных значениях вязкости и индукции магнитного поля. Полученные результаты могут быть полезны для понимания поведения магнитных жидкостей и оценки перспектив их применения, в том числе в задачах управляемой доставки лекарственных веществ с использованием магнитного поля [15-16].

Методы и материалы

В однородном магнитном поле на магнитную жидкость не действует результирующая сила, однако в неоднородном поле возникает сила, направленная в сторону увеличения напряженности поля. В простейшем виде магнитная сила, действующая на объем магнитной жидкости, пропорциональна градиенту квадрата магнитной индукции и магнитной восприимчивости среды. В случае капли магнитной суспензии вблизи постоянного магнита магнитное поле является существенно неоднородным. Это приводит к возникновению силы, стремящейся переместить каплю в сторону магнита. При этом магнитные частицы внутри капли могут перераспределяться, что вызывает изменение формы капли и появление вытянутых структур вдоль направления поля.

В работе магнитное поле создавалось аксиальным неодимовым магнитом (из сплава материалов неодим, железо, бор – NdFeB) N45 с формой шайбы и размерами: высота 30 мм, диаметр 50 мм; рабочая температура до 80°C. Сила сцепления 108,5 кг.

Магнит равномерно перемещался на расстоянии a от 7 см до 3 см до капли ферридной суспензии. Магнитное поле на рабочем участке канала можно считать постоянным, однако оно не является однородным, так как не выполняется условие $\sqrt{S} \gg a$, где a – расстояние от магнита до рабочего участка, S – площадь поверхности магнита. Магнитный поток Ф через микроканал не меняется:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0, \tag{1}$$

где t – параметр времени.

Магнитные силовые линии направлены не строго перпендикулярно вертикальной стенке каналов, однако, в связи с небольшим размером капли, можно считать, что магнитные силовые линии в области капли являются параллельными друг другу, что позволяет капле смещаться только по направлению к магниту.

Магнитная индукция постоянного магнита измерена с помощью прибора TD8620 Gaussmeter (измеряемый диапазон 200-2000 мТл, погрешность менее 5%). Измерения проводились в центральной области магнита. С увеличением

расстояния от поверхности магнита магнитная индукция уменьшается. График зависимости магнитной индукции постоянного магнита от расстояния *a* приведен на рис. 1. При измерении магнитной индукции на поверхности получаем значение 480 мТл. Магнитная индукция изменяется с расстоянием пропорционально $1/a^2$. Величина магнитного воздействия определяется не только свойствами суспензии, но и расстоянием до источника поля. При увеличении расстояния магнитная сила быстро убывает, поэтому движение капли начинается лишь при достижении некоторого порогового значения магнитного воздействия. Это особенно заметно для более вязких жидкостей, где внутреннее сопротивление препятствует перемещению магнитных частиц.

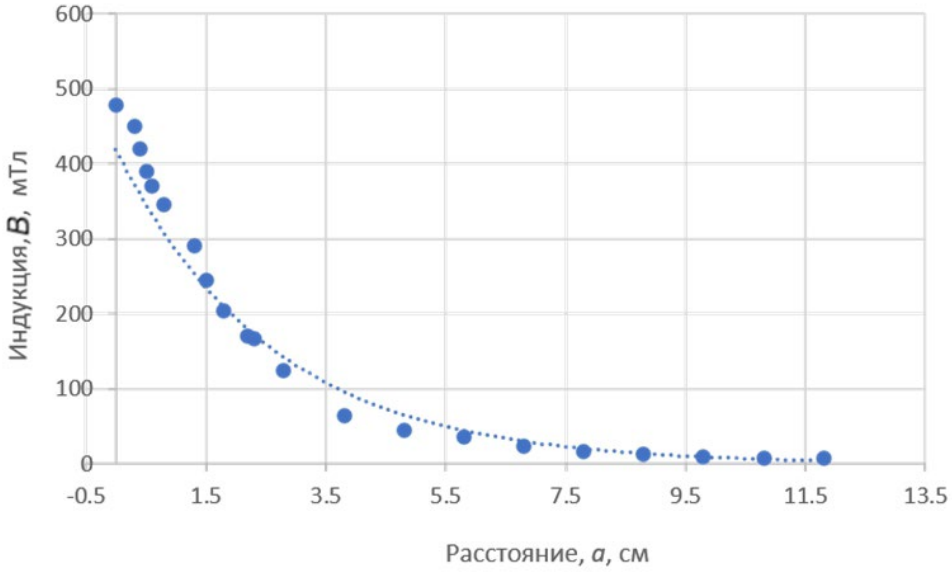


Рис. 1. График зависимости индукции поля постоянного магнита от расстояния

Методы измерения и экспериментальная установка

Изучение влияние магнитного поля на динамические характеристики капли ферридной суспензии проводились с использованием гидрогазодинамического стенда исследования многофазных и критических течений, подробное описание которого можно найти в работе Zubairova, Kravtsova и др. [12]. Постоянный магнит перемещался равномерно от значений расстояния 7 см в сторону объекта исследования параллельно поверхности, на которой находилась капля, создавая неоднородное магнитное поле, которое постепенно увеличивалось по мере приближения. Фотография рабочей части установки приведена на рис. 2.

Исследования проводились при комнатной температуре, составляющей 22°C. В работе использовались ферридные суспензии различной вязкости: 1сСт, 1,8сСт, 3,2сСт, 6,3сСт.

Видеофиксация проводилась с помощью камеры DMK 33UX250 с сенсором Sony IMX250, 2/3" CMOS, разрешением матрицы 2448x2048 пикс. Максимальная частота кадров на полном разрешении 75 к/с. Интерфейс управления и

передачи данных USB 3.0. Засветка осуществлялась светодиодной лампой (LED) в белом световом диапазоне 4000К, расположенной над объектом исследования. Такое взаиморасполодение лазера и камеры позволяло регистрировать путь, скорость и время движения ферридной капли.

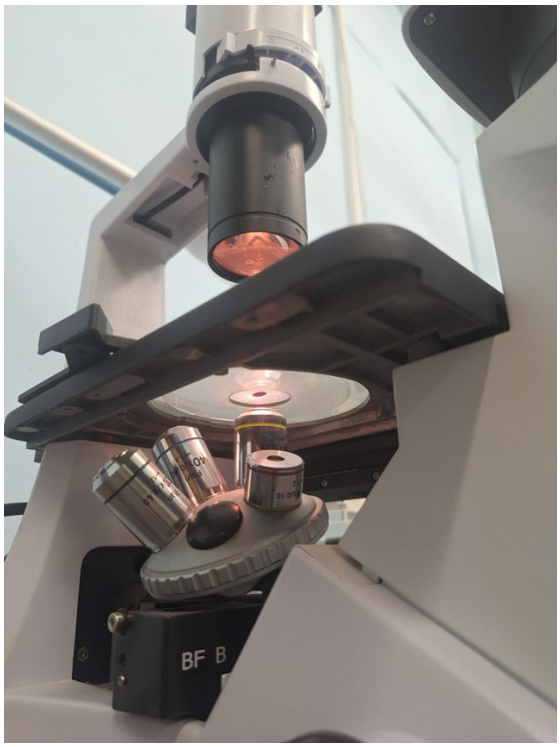


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

Результаты

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных ферридных частиц внутри капли суспензии ориентированы равновероятно по всем направлениям в пространстве. Результирующий средний магнитный момент парамагнетика равен нулю.

При расположении магнита на расстоянии от 7 мм до 5 мм магнитные частицы внутри капли ферридной суспензии выстраиваются в направлении линий магнитной индукции. За счет покрытия частиц поверхностно активными веществами, частицы не слипаются и не объединяются в кластеры под воздействием Ван дер Ваальсовых сил (сил взаимодействия между частицами). Частицы все время находятся во взвешенном состоянии и не оседают под воздействием силы тяжести. Температура жидкости при исследовании не превышала 30°С, тем самым не достигая критической температуры Кюри, равной 510–585 К.

При приближении постоянного магнита к капле ферридной суспензии магнитные силы возрастают, и наблюдается движение капли по поверхности. Скорость на расстоянии 5 – 4,5 см составляет 10 см/с, что является достаточно большим значением (рис. 3). Магнитные силы чуть превышают силы трения о поверхность и адгезию. При приближении магнита к капле ферридной суспензии

происходит разделение капли на две составляющих: магнитные частицы устремляются к магниту, жидкостная фаза остается на твердой поверхности. Для капель с большей вязкостью разделение на две фазы происходит при более близком расстоянии до магнита.

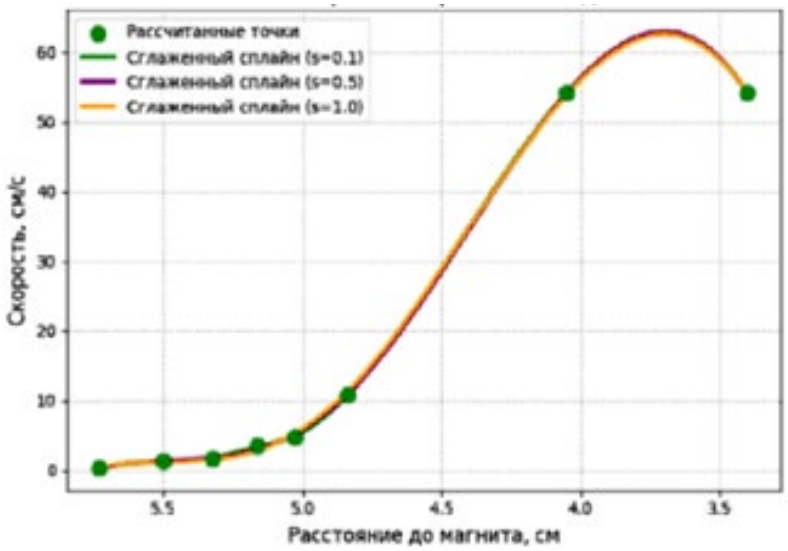


Рис. 3. Изменение скорости движения капли ферридной жидкости вязкости 3,2сСт с расстоянием до постоянного магнита

Таким образом, было зафиксировано начало движения капли, ее деформация и скорость перемещения. Пороговое расстояние, при котором капля начинала движение, и скорость ее перемещения зависели от вязкости жидкости и поверхности. Более вязкие суспензии задерживали движение магнитных частиц в капле и увеличивали пороговое расстояние до магнита.

Заключение

В работе было проведено экспериментальное исследование динамики капель ферридной суспензии на твердой поверхности под действием внешнего магнитного поля. Эксперимент выполнялся при варьировании вязкости суспензии и расстояния между каплей и магнитом.

Установлено, что движение капли магнитной суспензии начинается после достижения некоторого критического расстояния до магнита, зависящего от вязкости жидкости. Скорость движения капли составляла 10 см/с. При более близком расположении магнита к капле ферридной суспензии происходит разделение капли на две составляющих: магнитные частицы устремляются к магниту, жидкостная фаза остается на твердой поверхности.

Показано, что увеличение вязкости капли ферридной суспензии приводит к уменьшению скорости движения капли и увеличению времени отклика на действие магнитного поля. При вязкости капли в 1 сСт магнитные частицы быстро покидали объем капли, что препятствовало устойчивому движению капли как единого объекта. В более вязких растворах магнитные частицы дольше удерживались внутри капли, обеспечивая ее направленное движение.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (№ 126021217041-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rosensweig R. E. Ferrohydrodynamics. – Cambridge University Press, 1985. – 344 pp.

2. Colombo M., Carregal-Romero S., Casula M. F., Gutiérrez L., Morales M. P., Böhm I. B., Heverhagen J. T., Prosperi D., Parak W. J. Biological applications of magnetic nanoparticles // Chem. Soc. Rev., 2012. – V. 41. – 4306–4334.

3. De Gennes P.-G., Brochard-Wyart F., Quéré D., Reisinger A., Widom B. Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves // Physics Today, 2004. – V. 57 (12). – P. 66–67.

4. Jiang X. F., Wu Y. N., Ma Y., Li H. Z. Formation and breakup dynamics of ferrofluid drops // Chemical Engineering Research and Design. Part B, 2016. – V. 115. – P. 262–269.

5. Dababneh M.S., Ayoub N.Y., Odeh I., Laham N.M. Viscosity, resistivity and surface tension measurements of Fe3O4 ferrofluid // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1993. – V. 125. – Is. 1–2. – P. 34–38.

6. Khan A., Zhang S.-T., Li Q.-P., Zhang H., Wang Y.-Q., Niu X.-D., Wetting dynamics of a sessile ferrofluid droplet on solid substrates with different wettabilities // Physics of Fluids, 2021. – V. 33. – P. 042115.

7. Manukyan S., Schneider M. Experimental Investigation of Wetting with Magnetic Fluids // Langmuir, 2016. – V. 32 (20). – P. 5135–5140.

8. Cui G., Jacobi I. Magnetic Control of Ferrofluid Droplet Adhesion in Shear Flow and on Inclined Surfaces // Langmuir, 2020. – V. 36. – P. 10885–10891.

9. Cunha L. H. P., Siqueira I. R., Cunha F. R., Oliveira T. F. Effects of external magnetic fields on the rheology and magnetization of dilute emulsions of ferrofluid droplets in shear flows // Physics of Fluids, 2020. – V. 32. – P. 073306.

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

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

12. Zubairova U.S., Kravtsova A.Y., Romashchenko A.V., Pushkareva A.A., Doroshkov A.V. Particle-based imaging tools revealing water flows in maize nodal vascular plexus // Plants, 2022. – V. 11. – P. 1533.

13. Skripkin S.G., Starinskiy S.V., Tsoy M.A., Vasiliev M.M., Kravtsova A.Y. Effect of a textured surface on the occurrence and development of cavitation on the hydrofoil // Physics of Fluids, 2023. – V. 35. – P. 025109.

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

15. M. Babincová, P. Babinec Magnetic drug delivery and targeting: principles and applications // Biomedical Papers, 2009. – V. 153 (4). – P. 243–250.

16. Mehta J.S., Kumar R., Kumar H., Garg H. Convective Heat Transfer Enhancement Using Ferrofluid: A Review // Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2017. – V. 10. – Is. 2. – P. 020801-12.

© А. Ю. Кравцова, А. В. Трубин, Д. В. Литвинова, М. В. Кашкарова, 2026

УДК 535.243.2, 62-555.621
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-78-83

В. В. Рахманов[1]✉, С. В Двойнишников[1], В. Г. Мелединн[1], Г. В. Бакакин[1]

Экспериментальное исследование параметров микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для кремниевых фотоумножителей

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для кремниевых фотоумножителей (SiPM). Целью работы являлась верификация эффективности предложенной архитектуры в условиях реального температурного цикла (+10…+60 °C). Источник реализован на базе микроконтроллера, 12-битного ЦАП, высоковольтных усилителей и миниатюрных NTC-термисторов. Ключевой особенностью является биполярный выход (±48 В), обеспечивающий возможность питание SiPM с прямой и обратной полярностью включения. Эксперименты на двух образцах SiPM KETEK PM3325-WB-D0 показали, что микропроцессорный термокомпенсированный биполярный источник напряжения смещения обеспечивает стабилизацию коэффициента усиления с отклонением не более ±1,3 % при избыточном напряжении ≥1 В. Полученные данные подтверждают преимущество эффективность применения разработанного источника перед коммерческими аналогами по точности, универсальности и стоимости.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, температурная компенсация, напряжение смещения, избыточное напряжение

V. V. Rakhmanov[1]✉, S. V. Dvoynishnikov[1], V. G. Meledin[1], G. V. Bakakin[1]

Experimental study of parameters of a microprocessor-based temperature-compensated bipolar bias voltage source for silicon photomultipliers

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

Abstract. The article presents the results of an experimental study of a microprocessor-based temperature-compensated bipolar bias voltage source for silicon photomultipliers (SiPM). The aim of the study was to verify the effectiveness of the proposed architecture under real-world temperature cycling conditions (+10…+60°C). The source is implemented using a microcontroller, a 12-bit DAC, high-voltage amplifiers, and miniature NTC thermistors. The key feature is bipolar output (±48 V), which enables powering the SiPM with both direct and reverse polarity. Experiments on two SiPMs KETEK PM3325-WB-D0 samples showed that the microprocessor-based temperature-compensated bipolar bias voltage source stabilizes the gain to within ±1.3% with an overvoltage of ≥1 V. The obtained data confirm the advantage of the developed bias voltage source over commercial analogs in terms of accuracy, versatility, and cost.

Keywords: silicon photomultiplier, temperature compensation, bias voltage, overvoltage

Введение

Кремниевые фотоумножители (SiPM) активно применяются в прецизионных оптико-электронных системах благодаря высокому усилению, компактности и устойчивости к магнитным полям. Однако их коэффициент усиления имеет существенную зависимость от температуры [1], что требует применения различных методов компенсации.

Существуют различные методы температурной компенсации стабильности коэффициента усиления SiPM, основанные как на постобработке полученных данных с фотоприемника [2] с учетом температуры, так и на активной компенсации выходных сигналов фотоприемника [3]. Недостатком методов, основанных на постобработке результатов измерений, является низкое соотношение сигнал/шум выходного сигнала при росте температуры SiPM за счет снижения коэффициента усиления, что может приводить в высокой погрешности спектрометрических измерений. Недостатком метода коррекции выходного сигнала фотоприемника от температуры является то, что данный метод не компенсирует потерю динамического диапазона усиления SiPM от температуры, а корректирует уровень выходного сигнала, что может привести к неработоспособности фотоприемника при высоких температурах из-за чрезмерного снижения коэффициента усиления фотоприемника.

Наиболее эффектным методом температурной компенсации коэффициента усиления SiPM является метод динамического регулирования напряжения смещения фотоприемников в соответствии с текущей температурой [4]. Данный метод основан на измерении температуры SiPM при помощи термодатчика и последующей коррекции напряжения смещения V_{bias} для компенсации коэффициента усиления. Существует множество реализаций данного метода в виде аналоговых, цифровых и комбинированных схем [5-7]. Однако все они имеют те или иные ограничения и недостатки, такие как высокая сложность реализации, так как требуют модификаций кристалла SiPM, или низкий диапазон температур компенсации, или отсутствие биполярного выхода.

В данной работе представлено экспериментальное исследование параметров разработанного микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для кремниевых фотоумножителей. Основными отличиями от других реализаций являются:

– возможность подключения SiPM с разной полярностью за счет биполярного выхода;

– индивидуальная калибровка параметров термокомпенсации с хранением в энергонезависимой памяти;

– возможность как цифрового, так и аналогового управления выходным напряжением;

– масштабируемость на многоканальные системы.

Целью настоящего исследования является экспериментальная оценка температурной стабильности коэффициента усиления кремниевого фотоумножителя

при использовании разработанного микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения.

Описание системы и методика испытаний

Структура одного канала микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения включает в себя следующие основные элементы: NTC-термистор R_T в тепловом контакте с SiPM; модуль преобразования сопротивления в напряжение (ПТН); 10-битный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера (MCU), 12-битный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и высоковольтный усилитель (ВУ) (рис. 1).

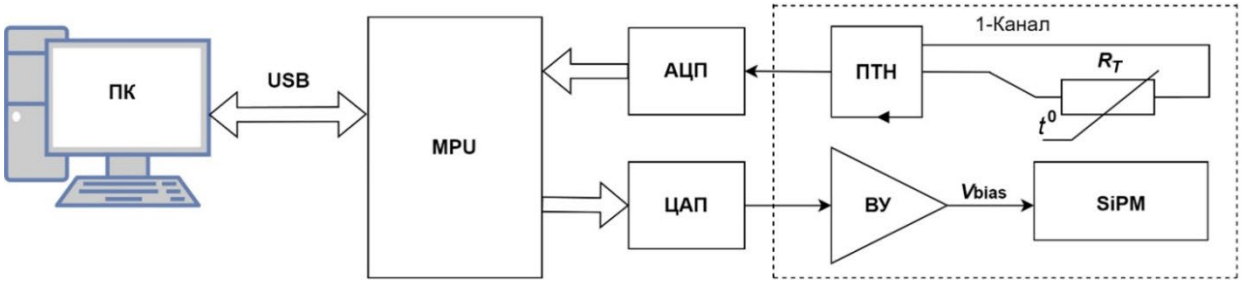


Рис. 1. Один канал микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для кремниевых фотоумножителей

В качестве NTC термистора использовался миниатюрный термистор BS7861-S с номиналом 10 кОм с допуском ±1 %, размещенный в непосредственном тепловом контакте с кристаллом SiPM. Модуль преобразования сопротивления в напряжение выполнен на основе прецизионного резистивного делителя с погрешностью резисторов ≤0,1 % и стабильным опорным напряжением 2,5 В от источника REF192 (суммарная погрешность во всем диапазоне температур не более ±0,08 %). В качестве АЦП применялся 10-битный преобразователь, встроенный в микроконтроллер ATmega328P, работающий с внешним опорным напряжением 2,5 В. Для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал использовался 12-битный ЦАП MCP4728 с четырьмя независимыми каналами. Высоковольтный биполярный усилитель построен на операционном усилителе OPA454 с двухполярным питанием ±50 В, обеспечивающем выходное напряжение смещения в диапазоне от –48 В до +48 В.

Принцип работы заключается в следующем. При изменении температуры SiPM его напряжение пробоя V_{bd} линейно изменяется в соответствии с выражением:

$$V_{bd}(T)=V_{bd}(T_0)+k\cdot(T-T_0),$$

где T – текущая температура, T_0 – температура, для которой приводится паспортное значение напряжения пробоя V_{bd}, и k – коэффициент температурной зависимости (мВ/^{0}С), характерный для конкретного экземпляра SiPM.

Для поддержания постоянного коэффициента усиления кремниевого фотоумножителя необходимо сохранять неизменным избыточное напряжение (*overvoltage*) $V_{ov}=V_{bias}-V_{bd}$.

Система измеряет текущую температуру через NTC-термистор, оцифровывает сигнал АЦП и передает его в микроконтроллер. На основе измеренной температуры и предварительно записанного в энергонезависимую память EEPROM значения коэффициента k микроконтроллер вычисляет требуемое напряжение смещения:

$$V_{bias}(T)=V_{bd}(T_0)+k\cdot(T-T_0)+V_{ov}.$$

Результат вычисления преобразуется в 12-битный цифровой код, который подается на ЦАП. Выходное напряжение ЦАП поступает на вход высоковольтного усилителя ВУ, формирующего биполярное напряжение смещения. Благодаря использованию линейного (не импульсного) источника питания и высоковольтного усилителя с малым дрейфом (входное смещение ≤±4 мкВ/°С), уровень шумов на выходе остается достаточно низким для прецизионных измерений.

Испытания проводились на стенде с двумя SiPM KETEK PM3325-WB-D0 (прямое и обратное включение), светодиодным источником (λ = 470 нм) и осциллографом Tektronix TDS3054. Температура изменялась от +10 °С до +60 °С. Измерялась нормированная амплитуда выходного сигнала как функция температуры.

Измерения проводились при четырех значениях избыточного напряжения: V_{ov}= [0,5, 1, 2, 3] В. Нормировка амплитуды выполнялась относительно значения при T=25 °С. Долговременная стабильность оптического источника была проверена отдельно: за 3 часа изменения амплитуды не превысили 0,2 %, что позволяет пренебречь этим фактором при анализе результатов.

Такая методика позволяет объективно оценить эффективность микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения как в условиях низкого, так и в условиях рабочего уровня избыточного напряжения.

Результаты

Экспериментальное исследование микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для кремниевых фотоумножителей было проведено на двух образцах SiPM KETEK PM3325-WB-D0: один подключен по схеме прямого включения (анод заземлен), второй – по схеме обратного включения (катод заземлен). Такая конфигурация позволила одновременно оценить работоспособность биполярного выхода источника смещения (±48 В) и стабильность компенсации при разных полярностях питания.

В табл. 1 представлены результаты относительного изменения амплитуды выходного сигнала SiPM (в %) при различных значениях избыточного напряжения и температурах для обоих образцов: P – прямое включение, N – обратное включение.

Таблица 1.

T, ^{0}C	P: V_{ov}=0,5	P: V_{ov}=1	P: V_{ov}=2	P: V_{ov}=3	N: V_{ov}=0,5	N: V_{ov}=1	N: V_{ov}=2	N: V_{ov}=3
10	1,60	0,23	-0,42	-0,20	2,64	-0,25	0,21	-0,87
15	1,16	0,52	-0,88	-0,11	0,94	-0,10	0,28	-0,63
20	0,21	0,54	-0,59	0,58	-0,90	0,44	0,18	0,05
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	-1,04	0,36	-0,44	-0,18	2,07	0,36	0,20	-0,24
35	1,28	0,49	-0,40	0,64	1,75	0,33	1,19	-0,13
40	1,28	0,29	-1,26	0,47	0,88	-0,13	0,53	-0,70
45	2,07	0,95	-0,92	0,21	-0,70	-0,23	0,03	-0,43
50	0,99	0,50	-0,51	0,27	0,79	-0,19	1,21	0,48
55	0,86	0,27	0,44	0,39	3,90	-0,05	0,78	-0,36
60	-0,63	0,01	-0,50	-0,09	0,08	0,56	0,17	0,34

Анализ полученных данных показал, что при $V_{ov}\geq1$ В максимальное отклонение выходного напряжения не превышает ±1,3 % как для прямого, так и для обратного включения, а в худшем случае (V_{ov}=0,5 В) отклонение составило не более 2,1 % для прямого и 3,9 % для обратного включения фотоумножителя. Производитель SiPM заявляет, что рабочий диапазон напряжений смещения V_{ov} составляет от 2 до 5 В. Таким образом, результат для V_{ov}=0,5 В связан больше с линейностью коэффициента усиления самого SiPM, а не с параметрами разработанного источника смещения.

Дополнительно протестирована корректность работы биполярного выхода. Данные эксперимента показывают, что передаточная функция модуля ВУ обладает низкой нелинейностью ±48 В (<0,3 %). При этом входной температурный дрейф по напряжению составляет не более 4 мкВ/°С. Максимальные выходной ток модуля ВУ составил 20 мА, что достаточно для большинства коммерческих кремниевых фотоумножителей.

Таким образом, по результатам экспериментальной верификации получена положительная оценка температурной стабильности коэффициента усиления кремниевого фотоумножителя при использовании разработанного микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения.

Заключение

Приведена архитектура и описаны основные узлы, отвечающие за метрологические характеристики, микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для стабилизации коэффициента усиления SiPM в широком температурном диапазоне.

Обеспечена температурная нестабильность коэффициента усиления тестируемых фотоумножителей на уровне не хуже ±1,3 % в диапазоне +10…+60 °С, при напряжении смещения от 1 до 4 В.

Разработанный источник одинаково эффективно обеспечивает температурную стабилизацию коэффициента усиления SiPM как в схеме с прямым, так и с обратным включением.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 126021217041-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. В. Рахманов, С. К. Качурин, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин. Исследование температурной зависимости коэффициента усиления микропиксельных лавинных фотоприемников / Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 8. – № 1. – С. 138–145. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-445-1.00008-7.10.33764/2618-981X-2025-8-138-145.

2. A. Kaplan, «Correction of SiPM temperature dependencies» Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 610, Issue 1, 2009, Pages 114–117, ISSN 0168-9002.

3. Лифантьев А. В., Лифантьев В. А., Имаев А. И. Способ температурной коррекции амплитуды сигналов с кремниевых фотоумножителей. Патент № 2846311 РФ, 2025 г.

4. Chang-ge Zi, Jin-fan Chang, Ming-jie Yang, Feng-fan Yang, Yu-Sheng Wang, «A compensation circuit for the gain temperature drift of silicon photomultiplier tube» Radiation Detection Technology and Methods, 2023, 7(4), pp. 571–5777.

5. Frach T, Prescher G, Degenhardt C, inventors; Philips Intellectual Property and Standards GmbH Koninklijke Philips NV, assignee. Temperature compensation circuit for silicon photomultipliers and other single photon counters. World patent WO 2010/070487. 2010 June 24.

6. John E. McKisson, Fernando Barbosa, inventors; Jefferson Science Associates LLC, assignee. Method for passively compensating for temperature coefficient of gain in silicon photomultipliers and similar devices. United States patent US 9,123,611. 2015 Sep. 1.

7. Wang Yi, Liu Qiwen, inventors; Jiangsu Sinogram Medical Technology Co ltd, assignee. Silicon photomultiplier bias voltage regulation gain compensation method. China patent CN 115980824A. 2023 Apr. 18.

© В. В. Рахманов, С. В Двойнишников, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин, 2026

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-84-90

В. О. Зуев[1]✉, С. В. Двойнишников[1], В. Г. Меледин[1], В. А. Павлов[1]

Метод фазовой триангуляции с адаптацией к нелинейности приемно-передаточной функции в условиях случайных аддитивных помех

[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 фазовой триангуляции для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов со светорассеивающими свойствами в широком диапазоне в условиях случайных аддитивных помех. Для обеспечения возможности фазовой триангуляции объектов в условиях динамичного изменения их светорассеивающих свойств предложен метод расшифровки фазового распределения с адаптацией к нелинейности приемно-передаточной функции. Его работа основана на поиске начальной фазы, при которой в методе фазовых шагов значения сформированной яркости наилучшим образом согласуются с значениями зарегистрированной интенсивности. Устойчивость предложенного метода расшифровки фазового распределения к случайным аддитивным помехам обеспечена с помощью статистической фильтрации входных значений интенсивности. Выполнено исследование эффективности разработанного адаптивного метода фазовой триангуляции. Показано уменьшение погрешности измерений на порядок по сравнению с известным методом расшифровки фазового распределения на основе ортогональных отношений тригонометрических функций. Можно сделать вывод, что применение предложенного метода контроля трехмерной геометрии на основе фазовой триангуляции значительно расширит диапазон светорассеивающих свойств контролируемой поверхности и условия ее диагностики.

Ключевые слова: фазовая триангуляция, нелинейная приемно-передаточная функция, случайные аддитивные помехи

V. O. Zuev[1]✉, S. V. Dvoynishnikov[1], V. G. Meledin[1], V.A. Pavlov[1]

Phase triangulation method with adaptation to receiving-transmitting function nonlinearity under the random additive noise conditions

[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 under the random additive noise conditions. A phase distribution decoding method with adaptation to receiving-transmitting function nonlinearity has been proposed to enable the objects phase triangulation under the conditions of their light scattering properties dynamic change. Its work is based on the initial phase search under which the generated brightness values best match the recorded intensity ones in the phase steps method. The stability of the proposed phase distribution decoding method to random additive noise has been ensured by the input intensity values filtering. The effectiveness of the developed adaptive phase triangulation method has been investigated. The measurement error is shown to decrease by an order of magnitude compared to the known phase distribution decoding method based on the trigonometric functions orthogonal ratios. It can be concluded that the application of the

proposed three-dimensional geometry control method based on phase triangulation can significantly expand controlled surface light scattering properties and its diagnosis conditions.

Keywords: phase triangulation, nonlinear receiving-transmitting function, random additive noise

Введение

Возможность прецизионного контроля геометрических параметров высокотехнологичных изделий является важнейшим фактором снижения рисков техногенных катастроф и повышения эффективности машиностроения, энергетики и других отраслей промышленности [1, 2].

Широкое практическое применение в данных задачах получили методы оптической триангуляции на основе структурированного освещения [3, 4]. Это связано с возможностью бесконтактного параллельного контроля трехмерной геометрии более сотни тысяч участков поверхности с погрешностью на уровне 0,01 % от размера измерительного объема. Для расширения области контроля геометрии непрозрачных объектов применяют методы фазовой триангуляции, устойчивые к расфокусировке элементов оптической системы [5, 6]. Несмотря на их активное развитие проблема прецизионного восстановления фазового распределения на основе зарегистрированных значений интенсивности остается актуальной. Это связано как с нелинейным характером приемно-передаточной функции измерительного тракта (рис. 1), так и с наличием случайных аддитивных помех, характерных для промышленности.

Возможность восстановления характера нелинейности приемно-передаточной функции напрямую с помощью линейного увеличения яркости равномерного изображения источника [7] и сохранения ее преобразования в регистрируемые приемником значения интенсивности существенно ограничена. Это связано с ростом отклонения данного преобразования от приемно-передаточной функции в процессе работы метода фазовых шагов с увеличением частоты фазовой модуляции интенсивности (рис. 1) в соответствии с амплитудно-частотной характеристикой оптической системы измерительного комплекса. Ограничением существующих методов компенсации нелинейности приемно-передаточной функции, основанных на ее аппроксимации степенными [8] и параметрическими [9] строго монотонными зависимостями, является необходимость их жесткого согласования с светорассеивающими свойствами диагностируемой поверхности. При их изменении нарушается согласованность ограниченных динамических диапазонов источника и приемника оптического излучения, непредсказуемым образом искажается характер нелинейности приемно-передаточной функции, что приводит к росту погрешности восстановления фазового распределения и контроля трехмерной геометрии диагностируемой поверхности.

Целью данной работы является разработка метода фазовой триангуляции с адаптацией к нелинейности приемно-передаточной функции в условиях случайных аддитивных помех.

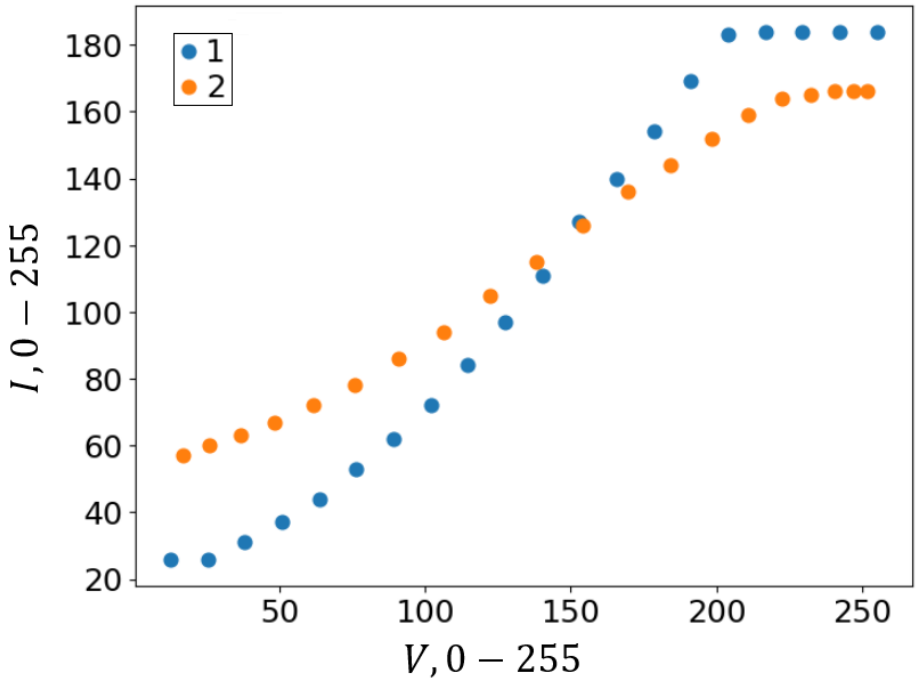


Рис. 1. Характерный вид приемно-передаточной функции при частоте пространственной модуляции интенсивности $f = 1$ (1) и $f = 50$ (2). V – формируемая источником яркость, I – регистрируемая приемником интенсивность

Адаптивный метод фазовой триангуляции

Для расшифровки фазового распределения в условиях неизвестного характера нелинейности приемно-передаточной функции и случайных аддитивных помех разработан адаптивный метод фазовой триангуляции. Расшифровка начальной фазы φ_0 реализуется независимо в каждом элементе матрицы фотоприемника. Входными данными алгоритма расшифровки начальной фазы, соответствующей элементу матрицы фотоприемника с координатами (x,y), являются зарегистрированные в нем в процессе работы метода фазовых шагов значения интенсивности $I^i_{(x,y)}$, а также распределение яркости V на изображениях, формируемых источником излучения:

$$V^i_{(P_X,P_Y)} = a_0 + a_1 \cdot \sin\left(\varphi_0\left(P_X, P_Y\right) + \frac{2\pi i}{N}\right), \quad (1)$$

$$\varphi_0\left(P_X, P_Y\right) = \frac{2\pi f P_X}{S}, \quad (2)$$

где $\left(P_X, P_Y\right)$ – координаты на формируемом изображении, α_0 – средняя яркость, α_1 – амплитуда, f – частота фазовой модуляции интенсивности, S – горизонтальное разрешение источника излучения, i – номер фазового сдвига, N – их

количество. Восстановление φ_0 из всего диапазона значений [0;2π) основано на итерационном интервальном бинарном поиске. Искомое значение φ_0 соответствует минимуму метрики *M*:

$$M(\varphi_0) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} I^i_{(x,y)} \cdot \cos\left(\varphi_0 + \frac{2\pi i}{N} \right) \right|. \quad (3)$$

Метрика *M* прямо пропорциональна внутренней площади контура, образованного точками с координатами (V^i, I^i) для каждого фазового сдвига. В случае ошибки выбора φ_0 внутренняя площадь данного контура будет увеличена (рис. 2) для любого характера нелинейности приемно-передаточной функции измерительного тракта.

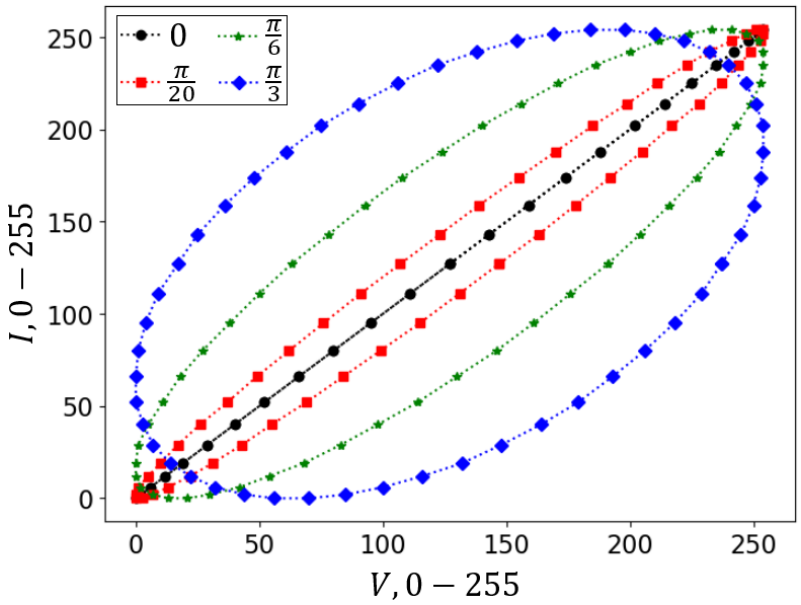


Рис. 2. Вид контура (Vi, Ii) в методе фазовых шагов при линейной приемно-передаточной функции и ошибках восстановления фазы 0, $\frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{6}$ и $\frac{\pi}{3}$

Для повышения устойчивости разработанного метода расшифровки фазового распределения к случайным аддитивным помехам в формирование и расшифровку структурированных изображений предложено включение элементов статистического анализа: формирования структурированного изображения для каждого фазового сдвига $\Delta\varphi_i$ *k* раз и усреднения зарегистрированных значений интенсивности:

$$I^i_{(x,y)} = \frac{\sum_{j=0}^{k-1} I^i_{(x,y,i)}}{k}. \quad (4)$$

Уровень аддитивных помех на анализируемых в конечном итоге данных может быть снижен в $\sqrt{k}$ раз.

Результаты компьютерного моделирования

Для верификации работоспособности и эффективности разработанного адаптивного метода фазовой триангуляции требуются значения интенсивности, зарегистрированные в процессе работы метода фазовых шагов, а также соответствующее им значение начальной фазы φ_0. Из-за влияния нелинейной приемно-передаточной функции и наличия случайных аддитивных помех значение φ_0 не могло быть восстановлено с требуемым уровнем достоверности в условиях реального физического эксперимента. В результате поставленная задача анализа работы предложенного метода фазовой триангуляции решена средствами компьютерного моделирования. Выполнено моделирование нелинейной приемно-передаточной функции, соответствующей характерным условиям реального эксперимента и частичной несогласованности динамических диапазонов источника и приемника оптического излучения, вызванной изменением светорассеивающих свойств диагностируемой поверхности:

$$V^i = 255 \cdot \frac{1 + \sin\left(\varphi_0 + \frac{2\pi i}{N}\right)}{2}, \tag{5}$$

$$I(V) = \begin{cases} 255, \text{ если } V > 150 \\ 255 \cdot \left(\frac{V}{150}\right)^{\gamma}, \text{ иначе} \end{cases}, \tag{6}$$

где V– формируемая яркость, I – регистрируемая интенсивность, φ_0 – начальное значение фазы, γ – степенной параметр нелинейности приемно-передаточной функции, i – номер фазового сдвига, N=50 – их количество. Для моделирования случайных аддитивных помех добавлен статистический шум с плотностью вероятности нормального распределения, средним значением 0 и среднеквадратичным отклонением 15.

По сравнению с известным методом расшифровки фазового распределения на основе ортогональных отношений тригонометрических функций [10] показано уменьшение погрешности измерений предложенным методом в 2 раза, а также в 11 раз при статистической фильтрации входных значений интенсивности на основе массива из 50 элементов (рис. 3).

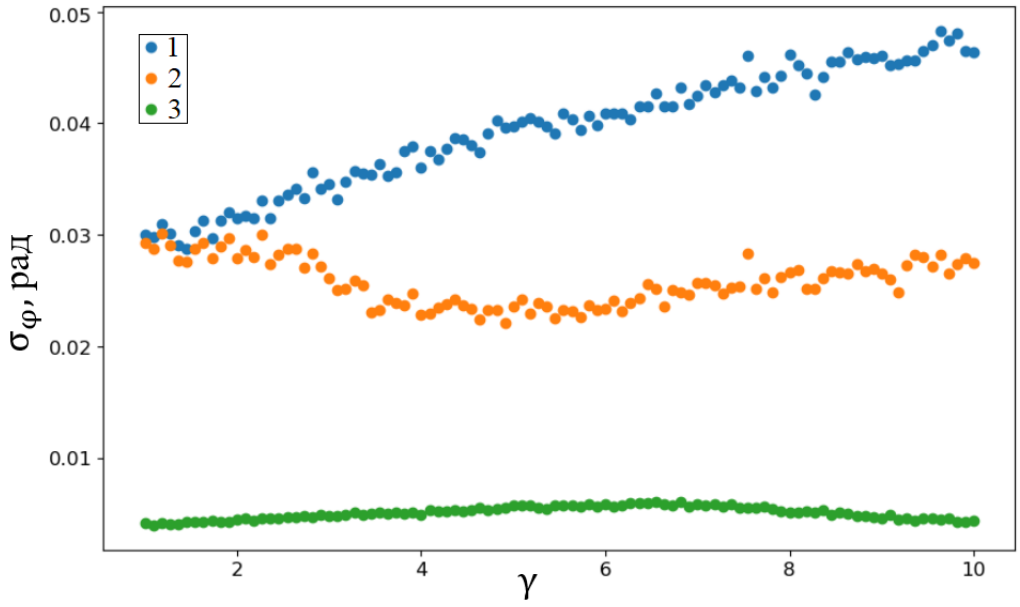


Рис. 3. Зависимость от параметра нелинейности приемно-передаточной функции γ среднеквадратичного отклонения σ_φ фазового распределения, восстановленного методами фазовой триангуляции: на основе ортогональных отношений тригонометрических функций (1), разработанным методом (2) и разработанным методом с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

Заключение

В работе предложен метод бесконтактного и прецизионного контроля трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов на основе фазовой триангуляции. Для исключения систематической погрешности в результатах трехмерных измерений предложен и автоматизирован устойчивый к случайным аддитивным помехам метод расшифровки фазового распределения с адаптацией к характеру нелинейности приемно-передаточной функции. Экспериментальные результаты подтверждают его работоспособность в условиях нелинейной приемно-передаточной функции и наличия случайных аддитивных помех, а также эффективность по сравнению с известными методами фазовой триангуляции. Результаты, полученные в рамках данной работы, открывают возможность разработки современных, полностью автоматизированных систем для бесконтактного контроля геометрических параметров высокотехнологичных изделий в широком диапазоне светорассеивающих свойств.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 126021217041-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чугуй Ю.В. Оптические информационные технологии для промышленных и научных применений // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. – С. 68–76.

2. Чертов А.Н., Хохлов Д.Д. Современные оптические методы бесконтактных геометрических измерений и восстановления 3D-формы поверхности объектов: обзор // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2024. – Т. 24. – №. 6. – С. 923–935.

3. Gao L., Veerakumar R., Liu Y., Hu H. Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model // Journal of visualization. – 2019. – Vol. 22. – P. 661–667.

4. Yang T., Gu F. Overview of modulation techniques for spatially structured-light 3D imaging // Optics & Laser Technology. – 2024. – Vol. 169. – P. 110037.

5. Alkhatib M.N., Shmelev Y.D., Tyshova O.A., Sinilshchikov I.V., Bobkov A.V. 3D measurement using fringe projection profilometry // Computer optics – 2023. – Vol. 47. – № 6. – P. 913–919.

6. Chen Y., Kemao Q. Phase-shifting algorithms with known and unknown phase shifts: comparison and hybrid // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – № 5. – P. 8275–8302.

7. Wang L., Zhang Y., Yi L., Hao X., Wang M., Wang X. Active projection nonlinear γ correction method for fringe projection profilometry // Journal of the Optical Society of America A. – 2022. – Vol. 39. – № 11. – P. 1983–1991.

8. 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. – Vol. 160. – P. 109084.

9. Sanchez-Torres M., Hernandez-Capuchin I., Ramirez-Fernandez C., Clemente E., Sanchez-Gonzalez J.L.J., Lopez-Martinez A. Recent advances in digital fringe projection profilometry (2022–2025): techniques, applications, and metrological challenges – a review // Metrology. – 2026. – Vol. 6. – № 1. – P. 3.

10. 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 – Vol. 109. – P. 23–59.

© В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, В. А. Павлов, 2026

УДК 532.295.5
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-91-96

М. А. Воробьев[1]✉, *А. О. Кархов*[1]

Влияние поверхностно-активных веществ на размеры газовых пузырей в потоке жидкости в наклонном канале

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

Аннотация. В статье приводятся итоги экспериментального изучения того, как поверхностно-активные вещества (ПАВ) воздействуют на распределение газовых пузырьков по диаметрам в жидком потоке, текущем по наклонной трубе. Роль ПАВ выполнял этанол. Газ вводился в поток жидкости через одиночный капилляр в нижней части рабочего канала. В ходе эксперимента варьировались такие параметры как: угол наклона рабочего канала 30÷60°; среднерасходная скорость жидкости 0 – 0,1 м/с; массовая концентрация спирта 0 - 1%. Диаметры газовых пузырьков измерялись по теневым фотографиям пузырькового течения. Были получены распределения пузырьков по размерам в зависимости от варьируемых экспериментальных параметров. Показано, что ПАВ подавляет коалесценцию пузырьков и существенно изменяет дисперсный состав потока. Увеличение скорости жидкости в канале приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырьков и уширению пиков распределения пузырей по размерам.

Ключевые слова: наклонный канал, пузырьковое течение, коалесценция, поверхностно-активные вещества

M. A. Vorobyev[1]✉, *A. O. Karhov*[1]

The effect of surfactants on the size of gas bubbles in a fluid flow in an inclined channel

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

Abstract. The results of an experimental study on the effect of surfactants on the size distribution of gas bubbles in a fluid flow in an inclined pipe are presented. Ethyl alcohol was used as a surfactant. Gas was introduced into the fluid flow through a single capillary in the lower part of the working channel. During the experiment, the following parameters were varied: the inclination angle of the working channel from 30° to 60°; the average liquid flow velocity from 0 to 0.1 m/s; the mass concentration of alcohol from 0 to 1%. The diameters of gas bubbles were measured from shadow photographs of the bubbly flow. Bubble size distributions were obtained as functions of the varied experimental parameters. It is shown that the surfactant suppresses bubble coalescence and significantly alters the dispersed phase composition of the flow. An increase in the liquid velocity in the channel leads to a decrease in the bubble detachment diameter and a broadening of the peaks of the bubble size distribution.

Keywords: inclined channel, bubbly flow, coalescence, surfactants

Введение

Газожидкостные двухфазные течения отличаются большим разнообразием и более сложными закономерностями по сравнению с однофазными гидродинами-

ческими процессами. Присутствие пузырьков газа в жидкости способно заметно влиять как на гидродинамические параметры потока, так и на тепломассоперенос. В ряде технических систем введение газовой фазы повышает эффективность работы, тогда как в других случаях ее появление нежелательно и может привести к аварийному режиму.

На сегодня вертикальные каналы с двухфазным потоком детально изучены. Однако во многих устройствах присутствуют также наклонные участки трубопроводов. Согласно работам [1 – 3], ориентация канала существенно сказывается на поведении течения, но при этом наклонные газожидкостные потоки остаются исследованы недостаточно. Отдельные публикации [4, 5]. рассматривают влияние угла наклона на интегральные характеристики (например, теплообмен), тогда как локальным особенностям газовых включений уделено крайне мало внимания. Между тем именно динамика пузырьков в пристенной зоне во многом определяет гидродинамику и теплообмен. В случае наклонных стенок движение пузырей становится более сложным, чем на вертикальных или горизонтальных участках.

Управление диаметром газовых включений в потоке, движущемся вдоль наклонной поверхности, путем изменения подачи жидкой и газовой фаз [6] осложняется их объединением друг с другом. Слияние пузырьков способно за короткое время трансформировать течение из мелкодисперсного в снарядный режим. Даже незначительные добавки ПАВ заметно воздействуют на отрывной диаметр пузырей, подъемную скорость и препятствуют их объединению при контакте. Следовательно, присутствие поверхностно-активных веществ позволяет работать с более широким набором расходных характеристик фаз, сохраняя в наклонном канале пузырьковую структуру без перехода к снарядному течению.

Задача данной работы заключалась в исследовании того, как поверхностно-активные вещества и скорость потока жидкости влияют на размерный состав пузырьков при нагнетании газа в движущуюся жидкость.

Методы и материалы

Конфигурация экспериментальной установки приведена на рис. 1. Более подробные сведения о конструкции стенда, процедуре проведения опытов и погрешностях измерений содержатся в работе [7]. Установка включает в себя замкнутый контур для циркуляции жидкости и незамкнутую линию подачи газа. С помощью центробежного насоса жидкая фаза нагнеталась в рабочий канал, выполненный из оргстекла в виде трубы длиной 1,2 метра с внутренним диаметром d_{ch} = 32 мм. Эксперименты выполнялись при фиксированном значении среднерасходной скорости жидкости U_L = 0,01 м/с, которую находили как частное от деления объемного расхода Q_L на площадь поперечного сечения S канала. Подача газа (воздуха) в жидкую среду осуществлялась через одиночный капилляр с внутренним диаметром d_0 = 0,2 мм. Капилляр располагался в нижней части трубы, соосно течению, а его выходное отверстие было размещено в центре сечения канала. Объемный расход газа Q_g составлял 5 мл/мин. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор этилового спирта концентрацией 0 или

1 масс. %. Регистрация пузырьков велась с помощью камеры Nikon Zfc. Расстояние от точки инжекции до зоны видеосъемки равнялось L = 400 мм. Угол наклона канала θ измерялся от вертикального направления (θ = 0°) и варьировался в пределах 30–60°, что согласуется с условиями, описанными в работах [7–9]. На выходе из канала двухфазный поток направлялся в сепарационный бак для разделения фаз. Температура рабочей жидкости поддерживалась на уровне 25±0,1 °C. Обработка теневых изображений потока производилась автоматически с применением алгоритмов, написанных на Python.

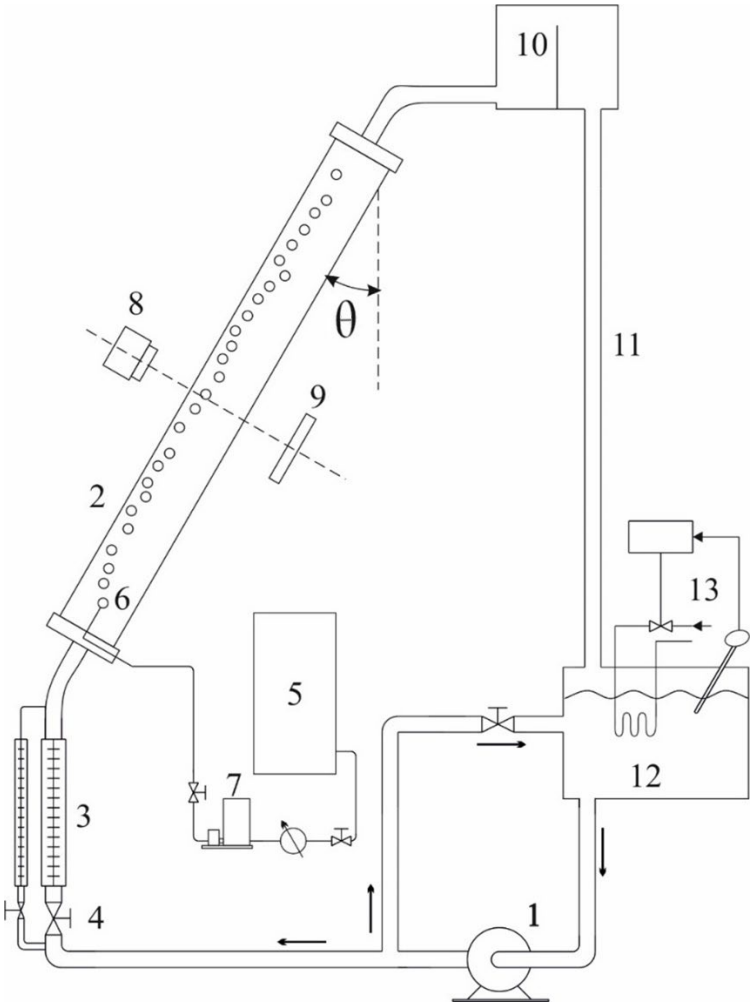


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – насос, 2 – рабочий канал, 3 – система ротаметров, 4 – регулировочные краны, 5 – компрессор, 6 – капилляр, 7 – газовый контроллер, 8 – фотокамера, 9 – светодиодная матрица, 10 – бак-сепаратор, 11 – возвратная труба, 12 – бак, 13 – система термостабилизации

Результаты

Результаты, полученные на чистой воде, представлены на рис. 2. Измерения выполнялись при среднерасходных скоростях жидкости U_L, равных 0 и 0,1 м/с, фиксированном объемном расходе газа 5 мл/мин и на удалении 400 мм от места

впрыска газа вдоль канала. По вертикальной оси графика отложена величина, представляющая собой отношение совокупного объема пузырьков, чьи диаметры попадают в интервал вблизи рассматриваемого значения, к общему объему газа в исследуемой выборке. Видно, что присутствие потока жидкости существенно изменяет распределение пузырьков по размерам для всех исследуемых углов наклонов канала. С одной стороны, наличие потока жидкости уменьшает отрывной диаметр пузырьков [6], что проявляется на рисунке, как небольшой сдвиг пиков распределения влево по горизонтальной оси. Также, при появлении потока жидкости, происходит уширение пиков на графиках.

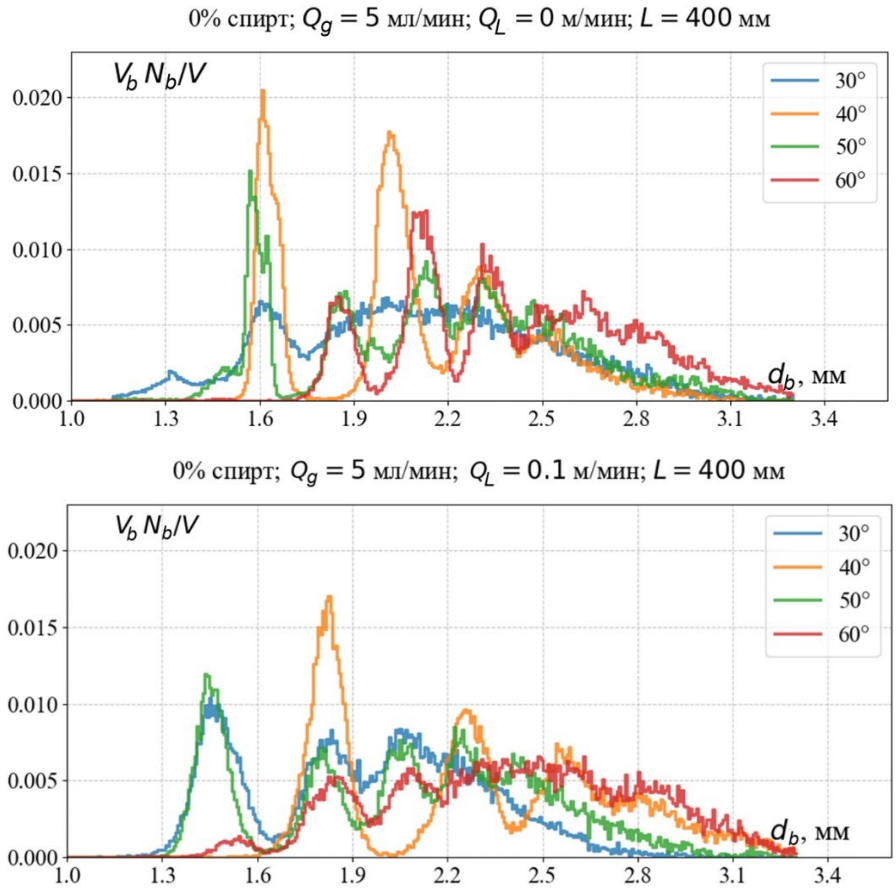


Рис. 2. Распределение пузырей по размерам, 0% этанола

На рис. 3 приведены аналогичные распределения пузырей по размерам, но в случае, когда в качестве рабочей жидкости выступал 1 % водный раствор этанола. Видно, что наличие ПАВ приводит к значительному снижению вероятности коалесценции пузырьков (что выражается в практически полном отсутствии вторичных пиков на гистограмме) и к небольшому уменьшению отрывного диаметра пузырей, что согласуется с результатами работы [9]. Как и в дистиллированной воде, присутствие потока жидкости приводит к уменьшению отрывного диаметра пузырьков и уширению пиков распределения.

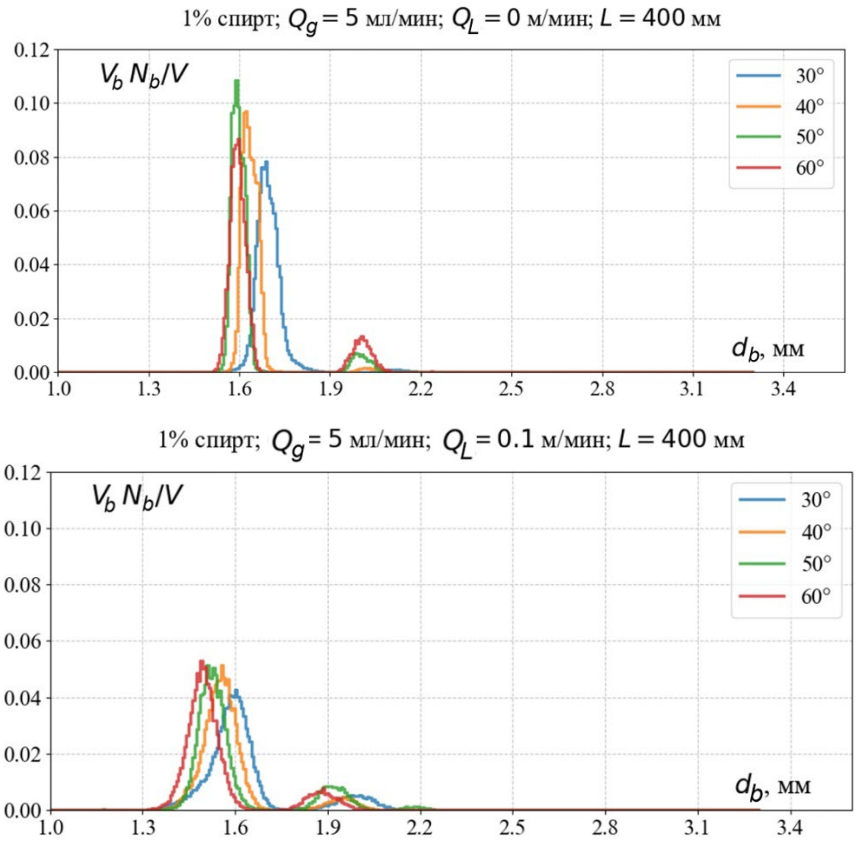


Рис. 3. Распределение пузырей по размерам, 1% этанола

Заключение

В ходе экспериментальной работы изучалось влияние поверхностно-активных веществ, угла наклона трубы и скорости жидкой фазы на фракционный состав газовых пузырьков в двухфазном потоке, движущемся по наклонному каналу. По результатам измерений построены гистограммы распределения пузырей по размерам. Установлено, что присутствие ПАВ препятствует слиянию пузырьков и заметно трансформирует дисперсную структуру течения. При повышении скорости жидкости в канале отрывной диаметр пузырьков снижается, а пики на кривых распределения по размерам становятся более широкими.

Благодарности

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект №126021217041-1).

Анализ экспериментальных данных и автоматизация обработки экспериментальных данных выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121032200034-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашинский О.Н., Чинак А.В., Каипова Е.В. Пузырьковое газожидкостное течение в наклонном прямоугольном канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10. – № 1. – С. 71–78.

2. Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Курдюмов А.С. Влияние угла наклона на локальные характеристики восходящего газожидкостного течения в круглой трубе // ПМТФ. – 2025. – Т. 392. – № 4. – С. 110–117.

3. Barnea D., Shoham O., Taitel Y., Dukler A.E. Gas-liquid flow in inclined tubes: Flow pattern transitions for upward flow // Chem. Eng. Sci. – 1985. – Т. 40. – № 1. – С. 131–136.

4. Chinak A.V., Gorelikova A.E., Kashinsky O.N., Pakhomov M.A., Randin V.V., Terekhov V.I. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // Int. J. Heat Mass Transf. – Elsevier Ltd, 2018. – Т. 118. – С. 785–801.

5. Khodadadi S., Taleghani M.H., Domiri Ganji D., Gorji-Bandpy M. Heat transfer enhancement via bubble dynamics along an inclined wall // Int. Commun. Heat Mass Transf. – Elsevier Ltd, 2023. – Т. 145. – № PA. – С. 106829.

6. Vorobyev M., Lobanov P., Chinak A., Kashinsky O. Effect of flow direction and capillary orientation on the bubble detachment diameter in liquid cross-flow // Exp. Comput. Multiph. Flow. – 2025. – Т. 7. – С. 323–335.

7. Кархов А.О., Воробев М.А. Влияние поверхностно-активных веществ в малых концентрациях на характеристики газовых пузырей в газожидкостном потоке в наклонном канале // Теплофизика и Аэромеханика. – 2026. – Т. 33. – № 1. – С. 45–51.

8. Vorobyev M.A., Karhov A.O. Influence Of Surfactants In Low Concentrations On The Bubbles Rising Velocity In Inclined Channel // J. Eng. Thermophys. – 2025. – Т. 35. – № 1. – С. (in print).

9. Кархов А.О., Гореликова А.Е., Воробьев М.А. Влияние поверхностно - активных веществ в малых концентрациях на размеры газовых пузырей в наклонном канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2025. – Т. 32. – № 1. – С. 175–183.

© М. А. Воробьев, А. О. Кархов, 2026

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-97-101

М. В. Кашкарова[1]✉, А. Ю. Кравцова[1]

Мониторинг скорости возвратного течения вблизи структурных поверхностей обтекаемого тела при кавитации

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

Аннотация. В статье представлены результаты исследования характеристик кавитационного течения в условиях обтекания крыловидных тел с различной структурой поверхности. В работе сравнивались профили скорости возвратного течения в области пониженного давления на подсасывающей стороне тел обтекания, наклоненных на 21˚ относительно направления потока жидкости, в щелевом канале. Цель исследования – выявить влияние структуры поверхности обтекаемых тел на динамику и параметры возвратного течения при развитии кавитации. В ходе исследования изучались две модельные конструкции крыловидных тел обтекания с отличающимися структурными характеристиками поверхности (r = 0,5 мм, l = 1 мм и r = 0,5 мм, l =2 мм). Проводился мониторинг скорости возвратного течения в трех контрольных точках в зоне пониженного давления за каждым телом. Измерения выполнялись в щелевом гидродинамическом канале с водой в качестве рабочей жидкости. Основные результаты содержат сравнительный анализ профилей скорости возвратного течения для трех точек измерения в области пониженного давления вблизи профилей с разными структурными поверхностями. Выводы демонстрируют, что структурные особенности поверхности обтекаемого тела существенно влияют на формирование и развитие возвратных течений в кавитационной зоне. Полученные данные могут быть использованы для совершенствования гидродинамических крыловых профилей в насосах и других устройствах, работающих в условиях кавитации.

Ключевые слова: кавитация, возвратное течение, обтекание тел, структурная поверхность, щелевой канал, профиль скорости, крыловидные тела обтекания

M. V. Kashkarova[1]✉, A. Yu. Kravtsova[1]

Monitoring of the re-entrant flow velocity near the structural surfaces of a body during cavitation

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

Abstract. The article presents the results of studying the characteristics of cavitation flow around wing-shaped bodies with different surface types. In the paper the velocity profiles of the return flow in the low-pressure region behind streamlined bodies tilted 21 degrees relative to the flow direction in a slit channel was compared. The aim of the study was to show the influence of the surface structure of flowing bodies on the dynamics and parameters of the return flow during the development of cavitation. In the course of the study, two model designs of wing-shaped flow bodies with different structural characteristics of the surface (r = 0.5 mm, l =1 mm and r = 0.5 mm, l =2 mm) were studied. The velocity of the return current was monitored at three control points in the low-pressure zone behind each body. The measurements were performed in a slit hydrodynamic channel with water as a working fluid. The main results contained a comparative analysis of the return flow velocity profiles for three measurement points in the low-pressure region behind profiles with different structural surfaces. The conclusions demonstrated that

the structural features of the surface of a streamlined body significantly affect the formation and development of return flows in the cavitation zone. The obtained data can be used to improve hydrodynamic profiles in pumps and other devices operating in cavitation conditions.

Keywords: cavitation, re-entrant jet, body, structural surface, slit channel, velocity profile, hydrofoil

Введение

Высокие скорости потока воды приводят к закономерному возникновению кавитации в области за обтекаемыми телами, что нередко вызывает неблагоприятные последствия. Множество научных трудов посвящено вопросам управления кавитацией и ее подавления. Например, в [1] исследовано, как выступающие кромки и рельеф поверхности влияют на кавитационные процессы и формирование шумового фона за крылом. Факторы, влияющие на картину кавитационного течения, такие как плотность жидкости, угловая скорость и др., были описаны в [2]. Подавляющее большинство исследований проводятся для кавитационного обтекания тел в широком канале. В щелевом канале тоже возможно возникновение кавитации, характер которого интересует исследователей, т.к. ее воздействие на поток неоспоримо. В источнике [3] проведено исследование обтекания цилиндрической преграды в условиях щелевого канала. Установлены закономерности развития кавитационной каверны, и выявлены частотные параметры процесса. В данной работе изучается кавитационное взаимодействие потока с крыловой преградой, имеющей структурированную шероховатость, в щелевом канале; особое внимание уделено исследованию скоростного поля вблизи шероховатой поверхности.

Методы и материалы

Моделирование щелевого кавитационного потока проведено средствами CFD-пакета STAR CCM+. Геометрия расчетной области (параллелепипед) повторяла размеры установки ИТ СО РАН (145 × 120 × 1,2 мм). Внутри канала размещались крыловидные тела с структурированной шероховатостью. Исследовалось течение в двух каналах идентичной геометрии, но с различными телами обтекания – крыловыми профилями NACA 012 (длина 70 мм). Шероховатость создавалась цилиндрическими выемками диаметром 0,5 мм; расстояние между центрами выемок различалось: 1 мм и 2 мм соответственно. Профиль устанавливался в центре канала, на расстоянии 50 мм от входа, под углом 21° к потоку. Сетка состояла из $9 \cdot 10^6$ прямоугольных ячеек с локальным измельчением в зоне обтекаемых тел. Число Куранта в расчете не превышало 0,5, рабочая жидкость – вода.

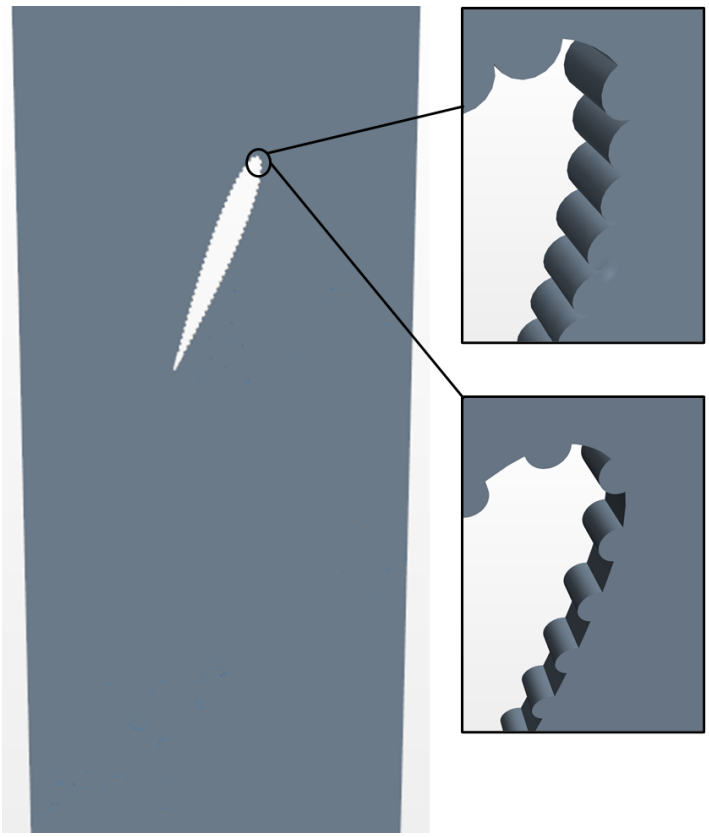


Рис. 1. Область исследуемого потока. Детализированное изображение поверхностей тел обтекания

В качестве базовых уравнений для моделирования трехмерного двухфазного нестационарного обтекания крылового профиля с нанесенной структурированной шероховатостью в щелевом канале выбраны уравнения Навье-Стокса. Турбулентность описывалась с помощью *k*-ω модели. Разделение фаз (вода/пар) моделировалось методом VOF и схемой HRIC, позволяющими определять границы раздела фаз с высоким разрешением. Рост и схлопывание кавитационных пузырьков рассчитывались по модели Рэлея-Плессета.

При постановке граничных условий учитывалось, что кавитация сопровождается образованием водяного пара. На входе задавались: скорость потока и объемные доли компонентов (вода – 1, пар – 0). На выходе моделировалось свободное истечение с соотношением фаз: вода – 0,098, пар –0,02. Стенки канала и тело обтекания задавались как твердые непроницаемые поверхности с условием прилипания.

Результаты

В целях изучения особенностей обтекания крылового профиля, имеющего структурированную шероховатость, в центральном сечении канала построены векторные поля распределения скоростей кавитационного потока за телом обтекания (рис. 2).

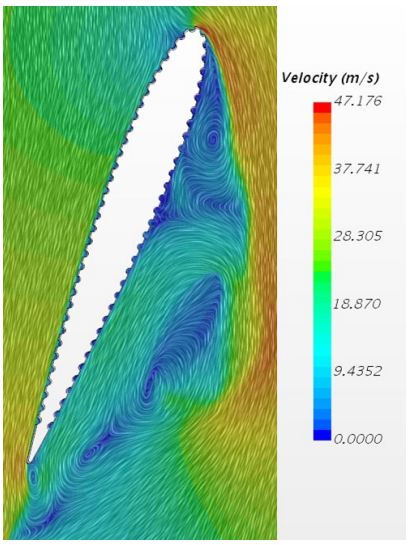


Рис. 2. Векторное поле магнитуды скорости течения с кавитацией

В области пониженного давления, локализирующейся за крылом обтекания (рис. 2) возникает зона пониженного давления, в которой образуются кавитационные каверны. На рис. 2 визуализируются возникающие в этой области сложные возвратные течения. Далее поставим 3 точки мониторинга в области возвратного течения (рис. 3).

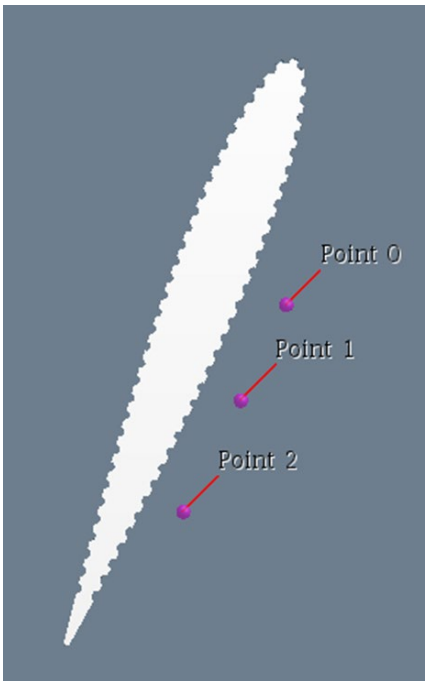


Рис. 3. Расположение точек мониторинга

В точках мониторинга регистрировались мгновенные значения величины скорости потока в каждый момент времени (Δt = 0,0001 с).

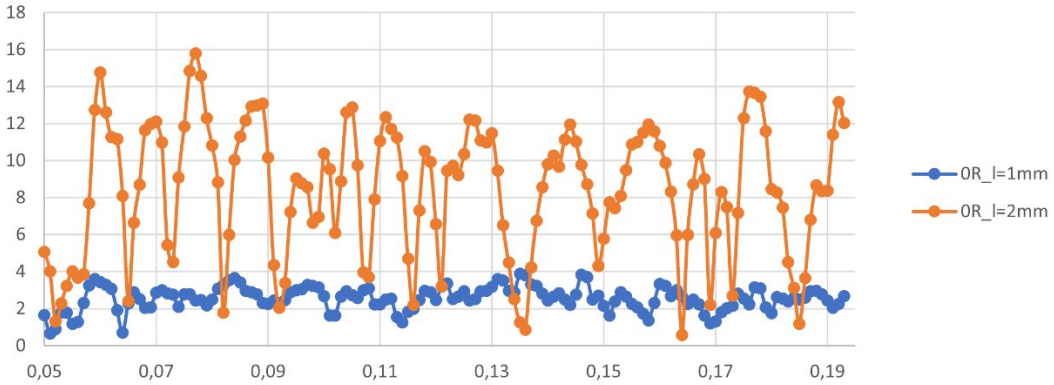


Рис. 4. График сравнения мгновенных значений скорости в точке мониторинга 0

Заключение

В работе было проведено математическое моделирование кавитационного потока за телами обтекания с различной структурированной поверхностью с помощью программного CFD-пакета STAR CCM+. Проведена визуализация потоков за телами обтекания. На построенных мгновенных векторных полях в обоих случаях визуализируются области возвратных течений. Проведен мониторинг мгновенных значений скорости в точках потока в области возвратного течения у тела обтекания. Установлено, что форма структурированной поверхности влияет на картину возвратного течения при кавитационном обтекании тел крыловой формы.

Благодарности

Работа по численному моделированию кавитационного потока жидкости вблизи тел со структурными неровностями выполнена в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (№ 126021217041-1), экспериментальные исследования возвратного течения жидкости вблизи тел крыловой формы со струкутрными неровностями на их поверхности выполнены в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (№ 126021217055-8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Çelik F., Usta O., Öksüz S., Delikan M., Kara E., Özsayan S., Ünal U.O. Experimental investigation of leading-edge tubercle and surface corrugation effects on cavitation and noise in partially cavitating twisted hydrofoils. ocean engineering. v. 324. 2025. 120646. issn 0029-8018. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120646.

2. Cui d., Liu x., Chen t., Wang g. investigation of unsteady ventilated partial cavitating flow around an axisymmetric body with particular emphasis on the vortex structure. theoretical and applied mechanics letters. v. 15, is. 4. 2025. 100596. issn 2095-0349. https://doi.org/10.1016/j.taml.2025.100596.

3. 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, А. Ю. Кравцова 2026

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-102-106

С. В. Двойнишников[1]✉, Г. В. Бакакин[1], В. О. Зуев[1], В. В. Рахманов[1]

Прецизионный оптико-электронный метод измерения диаметра движущихся цилиндрических объектов

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

Аннотация. Работа посвящена методу измерения диаметра цилиндрического объекта, движущегося в процессе измерения. В основе предложенного метода лежит проекционный теневой метод с определением границ обьекта на основе анализа градиента зарегистрированной интенсивности на изображении. Метод реализован с применением прямой коррекции систематической погрешности, обусловленной смазыванием изображения вследствие движения и наклона измеряемого объекта. Показано, что применение предложенного метода обспечило погрешность измерения диаметра цилиндрических объектов в движении на уровне 3 мкм.

Ключевые слова: топливная таблетка, измеренеие диаметра, оптический метод

S. V. Dvoynishnikov[1]✉, G. V. Bakakin[1], V. O. Zuev[1], V. V. Rakhmanov[1]

Precision optical-electronic method for measuring the diameter of moving cylindrical objects

[1]Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: dv.s@mail.ru

Abstract. This paper describes a method for measuring the diameter of a cylindrical object that is moving during the measurement process. The proposed method is based on the projection shadow method, which uses the gradient of the registered intensity in the image to determine the object's boundaries. The method is implemented using direct correction of the systematic error caused by image blurring due to the movement and tilt of the measured object. The paper demonstrates that the proposed method can achieve an accuracy of 3 microns in measuring the diameter of cylindrical objects in motion.

Keywords: fuel pellet, machine vision, defects in appearance

Введение

Оптико-электронные методы размерного контроля широко применяются в промышленности и науке [1-2]. В последние десятилетия особую популярность приобрели подходы, основанные на системах технического зрения и цифровой обработке изображений, что связано с развитием цифровых матричных фотоприемников [3-4].

Высокоточное измерение диаметра цилиндрических объектов востребовано для автоматизированного контроля в различных отраслях, например, при производстве топливных таблеток или гильз. Обычно измерения проводят на движущихся объек-

тах, используя малое время экспозиции для получения резкого изображения и минимизации погрешности.

Однако даже при короткой экспозиции возможно незначительное размытие изображения, которое становится критичным при произвольной ориентации объектов в зоне измерения. В этом случае систематическая погрешность зависит от множества параметров: угла наклона, скорости движения, параметров освещения и оптики, а также от алгоритма определения границ объекта.

Предварительная обработка изображений с помощью фильтров, например, преобразования Винера, может частично компенсировать размытие, но приводит к появлению артефактов и дополнительной погрешности из-за усиления шумов. В конечном итоге это может привести к еще большему росту погрешности.

Данная работа посвящена методу прямой коррекции систематической погрешности, обусловленной смазыванием изображения движущегося и наклоненного цилиндрического объекта.

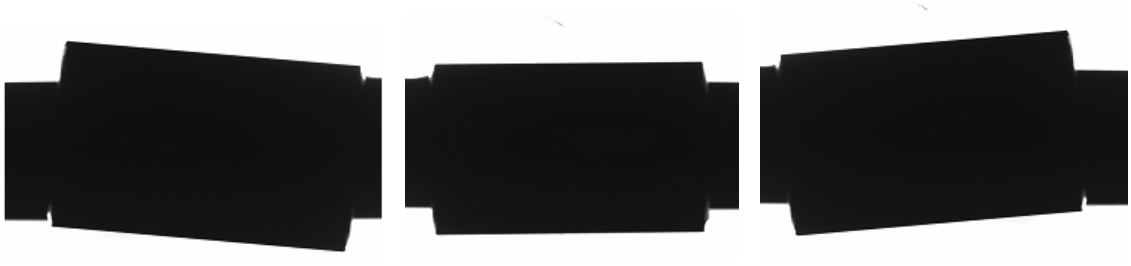
Описание метода измерения диаметра

В основе предложенного метода лежит проекционный теневой метод, который является одним из наиболее надежных бесконтактных способов измерения геометрических параметров [5-6]. Процесс измерения можно разделить на этапы: регистрация изображения, предварительная обработка и вычисление диаметра. Измеряемый цилиндрический объект освещается строго параллельным пучком света, создаваемым специальным осветителем. Проходя мимо объекта, свет формирует на удаленной плоскости его четкую тень – тенеграмму. Эту тенеграмму формирует проецирующая оптическая система в плоскости фотоприемника. Фотоприемник регистрирует полученное изображение в синхронном режиме таким образом, чтобы все тело измеряемого движущегося объекта попало в кадр.

Предварительная обработка нацелена на определение границ таблетки на изображении. Причем от точности определения границ напрямую зависит минимальная достижимая погрешность измерения. Для определения точного положения края объекта используется алгоритм поиска максимального значения производной интенсивности. На границе «объект – фон» происходит самый резкий перепад яркости, и пик первой производной позволяет локализовать эту точку с субпиксельной точностью. В результате формируется зависимость координат границ цилиндра от горизонтальной координаты. Для получения итогового значения диаметра производится усреднение результатов по множеству сечений, полученных при сканировании.

Важным аспектом метода является учет ориентации объекта. Поскольку измерение происходит на движущемся конвейере, цилиндрические детали могут поступать в зону контроля под разными углами. В данной работе рассматривается диапазон углов ориентации от –15° до +15° относительно горизонтального направления. Из-за наклона проекция цилиндра на плоскость изображения становится эллипсом, что вносит систематическую погрешность в результат.

Поэтому в алгоритм обработки заложена процедура внесения поправки, которая динамически корректирует измеренное значение в зависимости от текущей пространственной ориентации объекта относительно направления его движения.



а) б) в)

Рис. 1. Изображение цилиндрического объекта с различным углом наклона во время фоторегистрации:
а – отрицательный угол, б – угол около 0, в – положительный угол

Если во время регистрации изображения объект смещается вдоль вектора U на расстояние Z пикселей, то поправка delta на видимый диаметр в пикселях будет составлять:

$$\text{delta} = Z\frac{\left|\text{tg}\,\alpha\right|}{\sqrt{1+\text{tg}^2\,\alpha}}. \quad (1)$$

Тогда с учетом калибровки, в ходе которой получен коэффициент пересчета видимого размера объекта в диаметр, результат измерения диаметра цилиндрического объекта может быть записан:

$$D = K\left(R - Z\frac{\left|\text{tg}\,\alpha\right|}{\sqrt{1+\text{tg}^2\left(\alpha\right)}}\right), \quad (2)$$

где R – видимый размер цилиндрического объекта в пикселях, K – коэффициент пересчета из пикселей в микроны.

Экспериментальное тестирование

Метод был внедрен и испытан на реальном производстве – в системе автоматизированного измерения топливных таблеток на линии АО «УМЗ» (г. Усть-Каменогорск). Скорость движения таблеток по конвейеру составляла около 200 мм/с, длительность экспозиции фотоприемника была установлена на уровне 500 мкс. Таким образом, за время срабатывания затвора происходит смещение таблетки вдоль линии транспортировки на расстояние около 100 мкм.

Измерительный комплекс является частью автоматизированной линии, где после этапов шлифовки и очистки выполняется финальный контроль геометрии

и отбраковка по внешнему виду. Система была откалибрована на статичных эталонах (полированная сталь, неравномерность менее 1 мкм), что позволило достичь базовой погрешности менее 1 мкм без применения дополнительных компенсирующих зависимостей.

Для проверки системы в реальных условиях производился контроль партии таблеток с целевым диаметром 8,191 мм. В качестве эталона для сравнения использовался лазерный измеритель Zumbach 13TRIO-EN-EI (погрешность ±0,5 мкм), который зафиксировал у таблеток шероховатость и биение порядка 3 мкм. Теоретически, с учетом погрешности системы (3 мкм), суммарный разброс измерений должен был находиться в пределах ±6 мкм.

Экспериментальные данные, собранные с 1500 таблеток в течение 10 минут работы линии, продемонстрировали отклонение результатов измерения на уровне 6 мкм, что подтверждает требуемые метрологические характеристики измерительной системы (рис. 2.) Полученный результат однозначно свидетельствует о том, что динамические условия измерения вносят дополнительные погрешности. Это делает необходимой разработку и внедрение специализированных алгоритмов коррекции, отличных от тех, что применяются для обработки данных о статичных объектах.

Заключение

Предложен метод высокоточных измерений диаметра движущегося и наклоненного в пространстве измеряемого объекта. В основе предложенного метода лежит проекционный теневой метод с определением границ обьекта на основе анализа градиента зарегистрированной интенсивности на изображении. Метод реализован с применением прямой коррекции систематической погрешности, обусловленной смазыванием изображения вследствие движения и наклона измеряемого объекта. Показано, что применение предложенного метода обеспечило погрешность измерения диаметра цилиндрических объектов в движении на уровне 3 мкм. Разработанный метод внедрен и испытан на реальном производстве – в системе автоматизированного измерения топливных таблеток на линии АО «УМЗ» (г. Усть-Каменогорск).

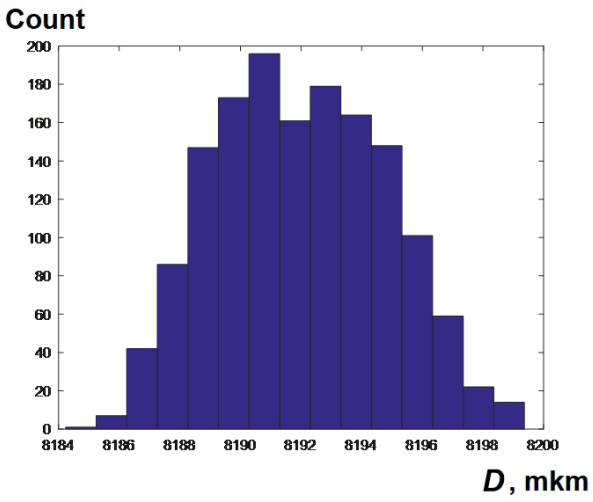


Рис. 2. Экспериментальные данные

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 126021217041-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин, В. Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии / В. Г. Меледин; отв. ред. чл.-корр. РАН С. В. Алексеенко. – Новосибирск : Академиздат, 2015. – 173 с.

2. DVOYNISHNIKOV S.V., KABARDIN I.K., MELEDIN V.G. (2020) ADVANCED PHASE TRIANGULATION METHODS FOR 3D SHAPE MEASUREMENTS IN SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. IN: SERGIYENKO O., FLORES-FUENTES W., MERCORELLI P. (EDS) MACHINE VISION AND NAVIGATION. SPRINGER, CHAM. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_21.

3. V. V. Rakhmanov, S. V. Dvoynishnikov, D. O. Semenov Diameter Measurement of Cylindrical Products With Displacement Compensation Along the Optical Axis // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, Vol.14, 2020. – P.169–174. DOI: 10.46300/9106.2020.14.26.

4. А. А. Голицын, С. А. Голицын, Н. А. Сейфи Применение метода взаимной корреляции изображений для расчета координат положения объектов круглой формы и измерения их размеров // Автометрия. – 2024. – Т. 60, №5. – С. 50–59.

5. CHUGUI, Y.V. 3D IMAGE FORMATION IN TRANSMITTED PARTIALLY COHERENT AND INCOHERENT LIGHT APPLIED TO DIMENSIONAL INSPECTION / Y.V. CHUGUI, E.S. SENCHENKO // 11TH LASER METROLOGY FOR PRECISION MEASUREMENT AND INSPECTION IN INDUSTRY 2014. SEPTEMBER 02-05, 2014, TSUKUBA, JAPAN. – PP. 363–367.

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. – Т. 58, № 1. – С. 40–46.

© С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. О. Зуев, В. В. Рахманов, 2026

УДК 681.786.4
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-107-112

В. Г. Меледин[1]✉, С. В. Кротов[1], В. Г. Главный[1], О. Ю. Садбаков[1]

Модуль генератора тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости

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

Аннотация. Работа посвящена развитию и реализации методов управления генерацией тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости, применяемого в экспериментальной гидро- и аэродинамике. Создан модуль генератора тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости, обеспечивающий генерацию импульсов тока с амплитудой до 70 А. Реализована трехуровневая модуляция тока накачки, обеспечивающая формирование черно-серо-белых треков за счет управления структурированным освещением измерительного объема. Микропроцессорное управление обеспечивает настройку параметров синхронизации и возможность непрерывной пересылки параметров модуляционной последовательности из компьютера. Модуль генератора тока накачки использован в лазерной синхронной системе на полупроводниковом матричном излучателе для измерения динамических полей скорости в экспериментальной гидро- и аэродинамике по изображениям треков частиц.

Ключевые слова: PTV, структурированное освещение, генератор тока накачки лазера

V. G. Meledin[1]✉, S. V. Krotov[1], V. G. Glavny[1], O. Yu. Sadbakov[1]

Module of the pump current generator for a high-power pulsed semiconductor laser for a track-based velocity meter

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

Abstract. The work is devoted to the development and implementation of methods for controlling the generation of pump current in a high-power pulsed semiconductor laser for a track-based velocity meter used in experimental hydro- and aerodynamics. A pump current generator module for a high-power pulsed semiconductor laser has been developed for the track-based velocity meter. This module ensures the generation of current pulses with amplitudes of up to 70 A. Three-level modulation of the pump current has been implemented, enabling the formation of black-gray-white tracks through control of structured illumination of the measurement volume. Microprocessor control provides adjustment of synchronization parameters and enables continuous transmission of modulation sequence parameters from a computer. The pump current generator module has been used in a laser synchronous system based on a semiconductor matrix emitter for measuring dynamic velocity fields in experimental hydro- and aerodynamics using particle track images.

Keywords: PTV, structured illumination, laser pump current generator

Введение

В современной экспериментальной гидро- и аэродинамике важнейшую роль играют методы и средства оптической невозмущающей диагностики потоков.

Наиболее часто в гидро- и аэродинамических экспериментах используются измерители, реализующие эйлеров подход. Скорость жидкости и газа при этом измеряется в определенных точках, а картина течения строится в результате последовательного сканирования пространства [1]. Методы лазерной анемометрии по изображениям треков частиц-трассеров (PTV, Particle Tracking Velocimetry) основаны на использовании альтернативного лагранжева подхода**,** при котором отслеживается движение и восстанавливаются фрагменты траекторий отдельных частиц во времени и пространстве [2-5].

В методах PTV формируют структурированное импульсное освещение измерительного объема в потоке жидкости или газа. Далее специализированные системы технического зрения регистрируют треки светорассеивающих частиц и выполняют компьютерную обработку зарегистрированных оптоэлектронных сигналов, восстанавливающую поле скорости потока [6-7].

Эффективность методов PTV во многом связана с качеством структурированного импульсного освещения измерительного объема. В первых PTV системах использовались газоразрядные ксеноновые фотовспышки [8], затем им на смену пришли импульсные Nd:YAG-лазеры [9].

Наиболее перспективными в настоящее время для формирования импульсного освещения представляются мощные полупроводниковые лазеры, освоенные промышленностью [9-14]. Их надежность и реализация требуемых для экспериментаторов параметров освещения во многом определяются генераторами тока накачки мощных лазерных диодов. Созданию подобного генератора тока накачки посвящена работа.

Метод и особенности реализации

Структура созданного генератора тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости представлена на рис. 1. Управление величиной тока лазера реализовано с помощью включенного последовательно с источником питания импульсно-управляемого генератора тока. Генератор тока выполнен на операционном усилителе, мощном полевом транзисторе IRL3716 с сопротивлением открытого канала около 3–5 мОм и шунтирующем резисторе величиной 0,001 Ом. Система регулирования на этих элементах обеспечивает необходимое качество импульсного тока в лазере при соответствующем импульсном управлении источником опорного напряжения.

Генератор тока обеспечивает трехуровневую модуляцию тока накачки, и, соответственно, реализацию двух видов структурированного освещения PTV измерительного объема. Первое состояние – освещение выключено (темный фон), ток накачки соответствует границе спонтанного излучения лазера. Второе состояние – полный ток накачки подан в лазерный диод, светорассеивающие частицы ярко освещены и формируют «белые» треки. Третье состояние реализовано подачей промежуточного тока накачки, соответствующего «серым» изображениям треков.

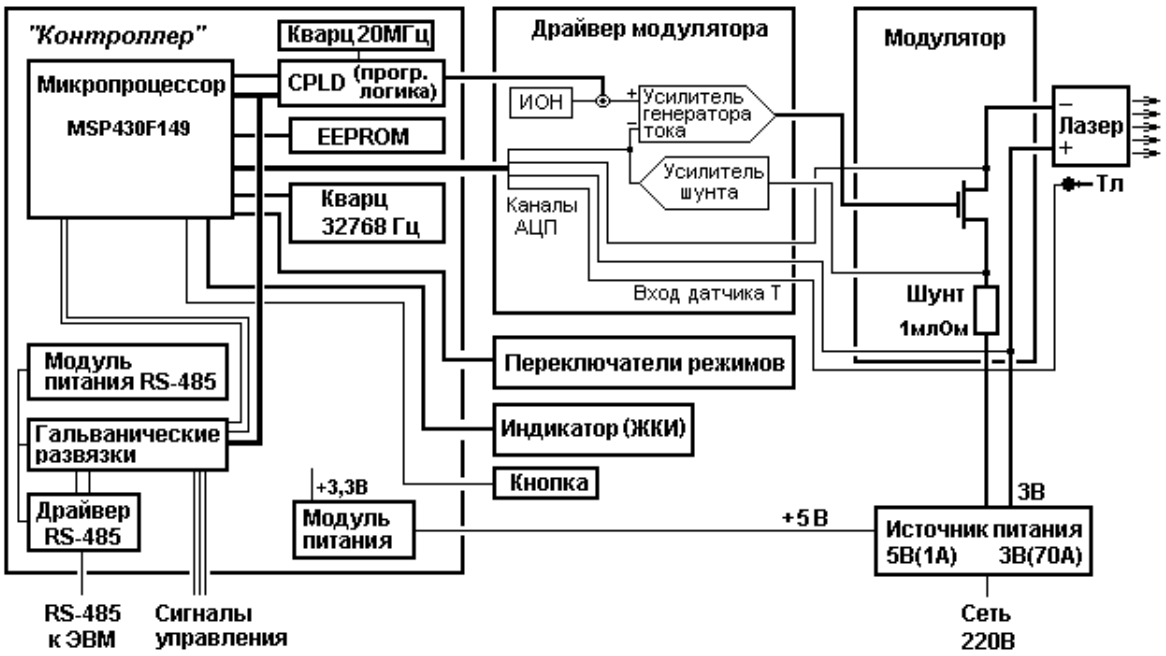


Рис. 1. Структура мощного импульсного полупроводникового лазера трекового измерителя скорости

Формирование наносекундных мощных импульсов тока накачки требуемой формы при импульсном управлении связано с решением ряда проблем. К ним относятся стабильность питания при импульсном токе нагрузки и нейтрализация влияния индуктивности проводников от источника тока до полупроводникового лазера.

Минимизация паразитных индуктивностей обеспечена использованием параллельно включенных проводов от источника питания до медных шин питания лазера с суммарным сечением 20 мм^2. Длина проводов и шин минимизирована. В разрыв одной из шин локально включены резисторный шунт и исток-сток полевого транзистора. Малое сопротивление резисторного шунта и канала исток-сток полевого транзистора обеспечили возможность стабилизации тока лазера величиной до 70 А при питании от источника напряжения величиной 3 В.

Для обеспечения безопасной и надежной работы полупроводникового лазера необходимо отсутствие паразитной высокочастотной генерации и значительных всплесков напряжения и тока на его выводах. Удовлетворительное качество переходных процессов и отсутствие генерации в системе регулирования получено как расчетными значениями корректирующих RC-цепочек в обратной связи усилителей, так и включением танталового конденсатора с емкостью 1000 мкФ на медные шины непосредственно около резисторного шунта. Конденсатор минимизирует отрицательное влияние паразитных индуктивностей проводов от источника питания (рис.2).

Для устранения высокочастотных колебательных процессов на лазере в местах подключения его выводов к шинам питания установлено 40 демпфирующих

RC-цепочек на основе чипа резисторов и конденсаторов, характеристики которых оптимизированы на основе компьютерного моделирования.

В устройстве был применен модернизированный источник питания от компьютера типа IBM PC с выходными напряжениями 3,0 В (ток до 70 А) и 5В (ток до 1 А). Источник был доработан для обеспечения возможности стабилизации выходного тока и импульсного управления его величиной.

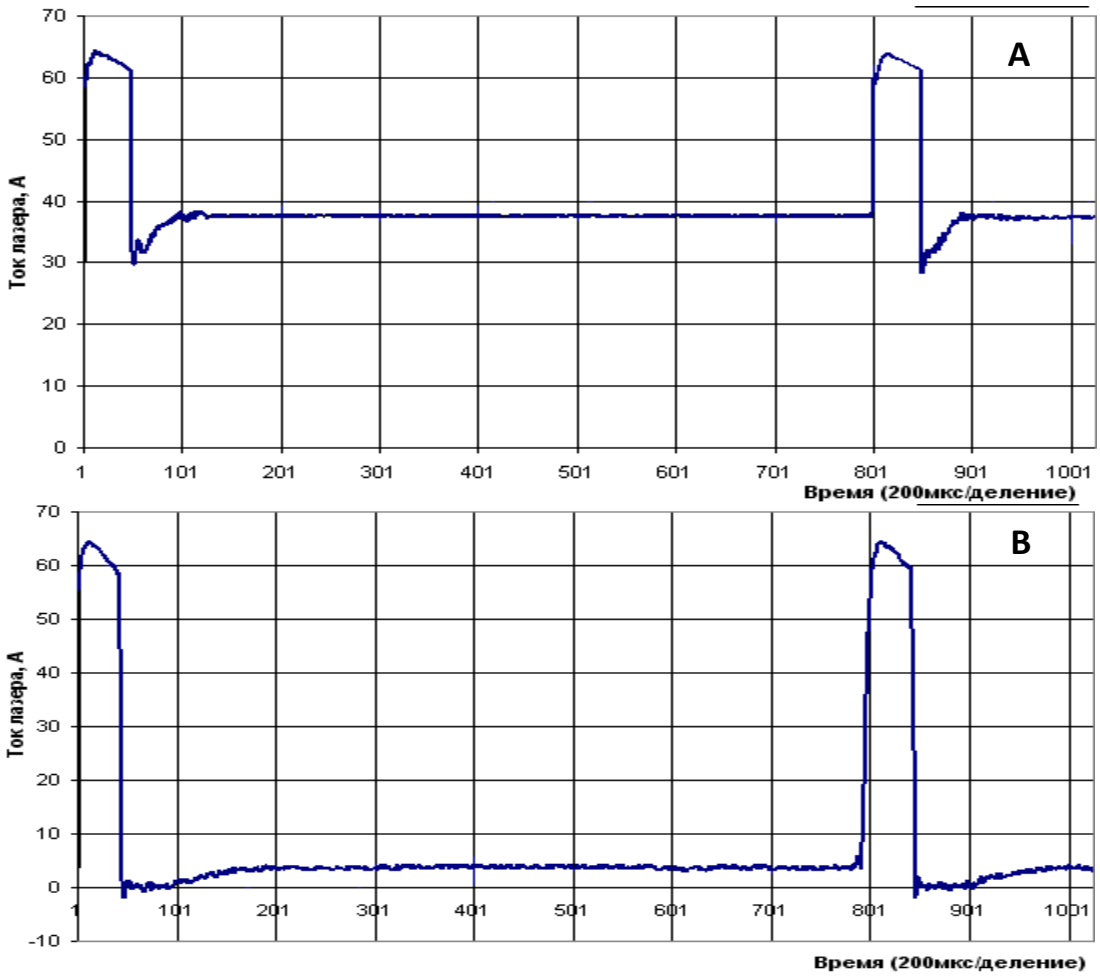


Рис. 2. Форма импульсов тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера трекового измерителя скорости при «серо-белой» модуляции (А) и при «черно-белой» модуляции (В)

Управление модулем генератора тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости реализовано на основе микропроцессорного контроллера. Он обеспечивает синхронизацию и возможность непрерывного управления пересылкой параметров модуляционной последовательности из постоянной памяти в микросхему программируемой логики (CPLD), осуществляющую управление драйвером модулятора тока накачки лазера.

Дополнительными функциями микропроцессорного контроллера являются постоянный контроль за температурами и напряжениями питания модуля и их почасо-

вая запись в технологический архив в энергонезависимой памяти EEPROM. Кроме того, осуществляется оперативная пересылка в компьютер параметров настройки и режимов контроля, выполняется индикация параметров на жидкокристаллическом индикаторе и обеспечивается работа устройства в тестовых и настроечных режимах.

Заключение

Создан модуль генератора тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости, обеспечивающий генерацию импульсов тока с амплитудой до 70 А. Обеспечена трехуровневая модуляция тока накачки и формирование черно-серо-белых треков за счет управления структурированным освещением в измерительном объеме. Микропроцессорное управление реализует синхронизацию и возможность непрерывной пересылки параметров модуляционной последовательности из компьютера. Модуль генератора тока накачки использован в модифицированной лазерной синхронной системе на полупроводниковом матричном излучателе PNV для измерения динамических полей скорости по изображениям треков частиц [15].

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 126021217041-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меледин, В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 3–12.

2. Cowen, E. A., Monismith, S. G. (1997). A hybrid digital particle tracking velocimetry technique. Experiments in Fluids, 22(3), 199–211.

3. Cowen, E. A. A hybrid digital particle tracking velocimetry technique / E. A. Cowen, S. G. Monismith // Experiments in Fluids. – 1997. – Vol. 22, № 3. – P. 199–211.

4. Maas, H. G. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows / H. G. Maas, A. Gruen, D. Papantoniou // Experiments in Fluids. – 1993. – Vol. 15, № 2. – P. 133–146.

5. Nishino, K. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing / K. Nishino, N. Kasagi, M. Hirata // Journal of Fluid Engineering. – 1989. – Vol. 111, № 4. – P. 384–391.

6. Angelsky, O.V., Bekshaev, A.Y., Hanson, S.G., Zenkova, C.Yu., Mokhun, I.I., Zheng, J. Structured Light: Ideas and Concepts // Frontiers in Physics, V.8, 2020. https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00114.

7. Lei, Y.-C. A vision-based hybrid particle tracking velocimetry (PTV) technique using a modified cascade correlation peak-finding method / Y.-C. Lei [et al.] // Experiments in Fluids. – 2012. – Vol. 53, № 5. – P. 1251–1268.

8. Adrian, R. J. Twenty years of particle image velocimetry // Experiments in Fluids. – 2005. – Vol. 39. – P. 159–169.

9. Wereley, S. T., Meinhart, C. D. Recent advances in micro particle image velocimetry // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2010. – Vol. 42. – P. 557–576.

10. Карачинский, Л. Я. Мощные полупроводниковые лазеры для систем визуализации потоков / Л. Я. Карачинский, Д. С. Папылев, И. И. Новиков // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53, № 4. – С. 321–328.

11. Папылев, Д. С. Полупроводниковые лазеры и приборы на их основе: учебно

методическое пособие / Д. С. Папылев, И. И. Новиков, С. С. Рочас, А. В. Кремлева, Л. Я. Карачинский ; Университет ИТМО. – Санкт Петербург: Университет ИТМО, 2024. – 71 с.

12. Смирнов, А. В. Применение импульсных полупроводниковых лазеров в системах PTV / А. В. Смирнов, Е. П. Васильев // Материалы X Всероссийской научной конференции «Современные проблемы лазерной физики». – Новосибирск, 2022. – С. 112–115.

13. Петров, Н. Г. Перспективные источники освещения для методов визуализации потоков / Н. Г. Петров, М. А. Иванова // Лазерные технологии и их применение: сб. науч. тр. / под ред. В. Л. Курочкина. – Москва : Физматлит, 2021. – Гл. 7. – С. 205–220.

14. Wereley, S. T. Recent advances in micro PIV and micro PTV using semiconductor lasers / S. T. Wereley, C. D. Meinhart // Experiments in Fluids. – 2020. – Vol. 61, No. 5. – P. 118.

15. Меледин, В. Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии / В. Г. Меледин; отв. ред. чл.-корр. РАН С. В. Алексеенко. – Новосибирск: Академиздат, 2015. – 173 с.

© В. Г. Меледин, С. В. Кротов, В. Г. Главный, О. Ю. Садбаков, 2026

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-113-119

А. В. Черданцев[1]✉, Л. П. Трубицына[1], А. З. Квон[1]

Выбор оптимальной конфигурации для PTV-измерений в кольцевом газожидкостном течении

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

Аннотация. Измерение полей скорости в обдуваемых газом пленках жидкости является сложной экспериментальной задачей. Целью данной работы является верная интерпретация изображений, полученных в тестовых экспериментах для различных конфигураций оптической системы. Для каждого варианта решена оптическая задача с анализом хода лучей, исследовано наличие слепых зон, смещения и деформации изображения области измерений. Объяснены особенности изображений и даны рекомендации по выбору оптимальной конфигурации системы измерений.

Ключевые слова: кольцевое течение, оптические искажения, Particle Tracking Velocimetry

A. V. Cherdantsev[1]✉, L. P. Trubitsyna[1], A. Z. Kvon[1]

Selecting optimal configuration for PTV-measurements in annular gas-liquid flow

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

Abstract. Measuring velocity fields in gas-sheared liquid films is a complex experimental task. The goal of this work is to accurately interpret images obtained in test experiments for various configurations of the optical system. For each configuration, the optical problem is solved with ray tracing analysis, and the presence of blind spots, displacements and deformations of the image in the measurement region are investigated. Image features are explained, and recommendations for selecting the optimal measurement system configuration are provided.

Keywords: annular flow, optical distortions, Particle Tracking Velocimetry

Введение

В кольцевом режиме газожидкостного течения жидкость течет тонкой пленкой по стенкам трубы, увлекаемая высокоскоростным газовым потоком. Такой режим реализуется в аппаратах атомной, нефтегазовой, химической промышленности и характеризуется высокой интенсивностью тепломассообмена. Ввиду высокой сложности течения (взаимодействие двух непрерывных фаз, наличие дисперсной фазы в виде капель и пузырьков, возмущенная межфазная граница, покрытая трехмерными волнами различных типов, сильная турбулентность в газовой фазе, значительные расстояния, необходимые для развития потока) его теоретическое и численное моделирование затруднено и не имеет ценности без прямой экспериментальной верификации. Экспериментальное исследование также является нетривиальной задачей в

силу приведенных выше причин. Даже измерения толщины пленки жидкости предъявляют высокие требования к измерительной системе [1]. Более тонкие измерения, например, измерения поля скорости в жидкой пленке, также требуют преодоления значительных трудностей, и по этой причине немногочисленны [2-4]. Данная работа посвящена подготовке к измерениям поля скорости и подбору наилучшего расположения измерительного оборудования относительно рабочего участка.

Методы и материалы

Эксперименты проводятся в горизонтальной оргстеклянной трубе длиной 2 м, с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенок 5 мм. Жидкость подается на дно трубы через щель, имеющую форму сегмента высотой 2 мм. Ввод газа отделен от ввода жидкости горизонтальной разделительной пластиной толщиной 1 мм. Скорость газа составляет от 10 до 40 м/с, расход жидкости – от 4 до 25 мл/с. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная вода с растворенным флюоресцентным красителем родамин 6Ж в концентрации 5 мг/л. Подробное описание установки приведено в [5].

Измерения проводятся методом анемометрии по траекториям частиц, известным в англоязычной литературе как Particle Tracking Velocimetry (PTV). В рабочую жидкость добавлены полиамидные частицы-трассеры с флюоресцентным покрытием. Частицы подсвечиваются непрерывным лазером с длиной волны 532 нм, освещающим одно продольное сечение канала. Изображения частиц регистрируются при помощи высокоскоростной камеры, оснащенной светофильтром, отсекающим рассеянный и отраженный свет лазера. Пространственное разрешение составляет около 7 мкм на пиксель, частота съемки – от 20 кГц. В процессе обработки отслеживается траектория каждого отдельного трассера, что позволяет измерить локальную скорость жидкости в пленке.

Рабочая область располагается на расстоянии около 1,5 м от входа в канал. В этой области канал заключен в оргстеклянный короб в форме параллелепипеда. Пространство между внешней стенкой трубы и внутренними стенками короба заполнено водой для уменьшения искажений, вызванных кривизной внешней поверхности трубы. В ходе тестовых экспериментов боковые стенки короба были расположены вертикально (рис. 1а). Однако, в процессе анализа изображений, полученных в этой конфигурации, было решено изучить вариант с расположением системы под углом к горизонту (рис. 1б).

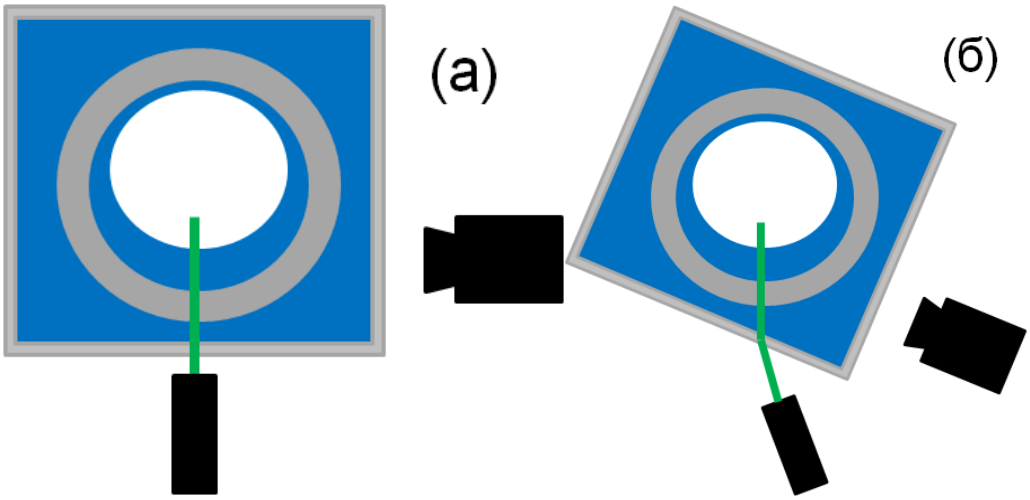


Рис. 1. Варианты расположения оптического короба, лазера и камеры относительно горизонтальной трубы:
(а) – вертикальное положение короба; (б) – расположение под углом.
Синий цвет обозначает воду, серый – оргстекло, белый – воздух, черный – оборудование, зеленый – лазерную плоскость

Результаты

Примеры изображений, полученных в конфигурации, соотвутствующей рис. 1(а), представлены на рис. 2. Свет лазера подсвечивает жидкость благодаря растворенному в ней флюорофору. По форме светящейся области можно восстановить мгновенную форму поверхности жидкости и измерить ее локальную толщину. Трассерные частицы «светятся» сильнее и выделяются на фоне жидкости. При обработке данных их можно выделить при помощи пространственных фильтров и измерить локальную мгновенную скорость каждого трассера, используя алгоритмы метода PTV.

В кольцевом течении присутствуют т.н. волны возмущения, представляющие собой крупномасштабные структуры, распространяющиеся с большой скоростью по тонкому остаточному слою жидкости. На рис. 2(а) показан кадр с волной возмущения. Здесь легко увидеть область с пленкой жидкости и трассерами в ней. Ниже располагается темная область, соответствующая стенке канала. Трассеры вблизи границы имеют скорость, близкую к нулю, что подтверждает нашу интерпретацию. Интересно отметить, что в темной области также наблюдаются отдельные трассеры. Это явление будет обсуждено ниже. Над пленкой жидкости располагается яркое хаотично освещенное пространство. Это изображение создано отражением флюоресцентного света от межфазной поверхности, расположенной между лазерной плоскостью и камерой [1].

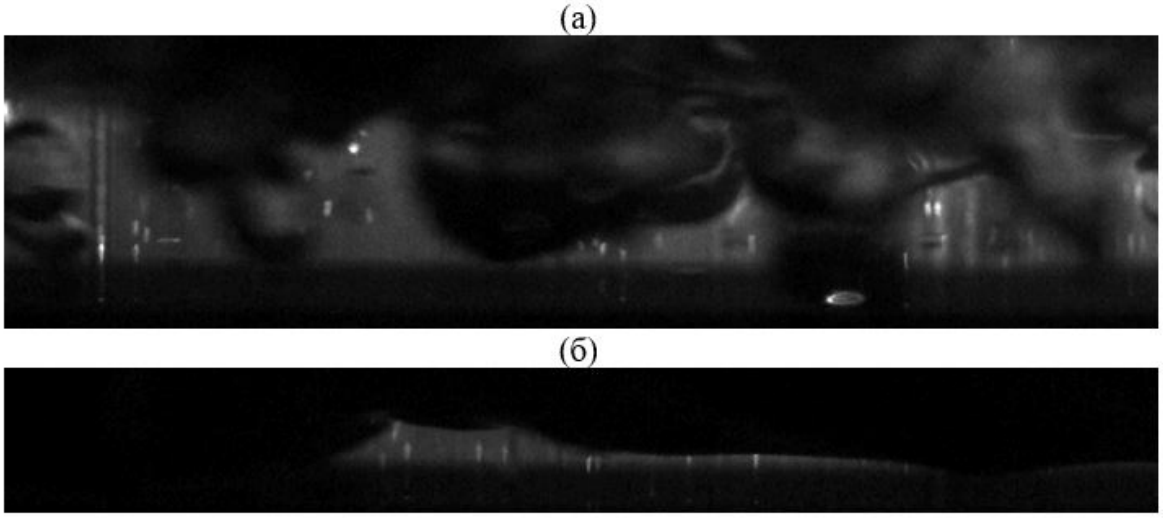


Рис. 2. Изображения пленки жидкости с частицами-трассерами:
(а) – волна возмущения; (б) – остаточный слой жидкости. Скорость газа 25 м/с, расход жидкости 25,1 мл/с, продольный размер области 7 мм

На рис. 2(б) показан кадр с остаточным слоем жидкости. На изображении светится лишь верхняя часть отдельной волны ряби на поверхности остаточного слоя; изображение пленки на соседних участках остается темным. При этом толщина слоя для приведенных условий составляет, согласно независимым измерениям методом лазерно-индуцированной флюоресценции, примерно 0,3 мм, и значительно (в 40 раз) превосходит пространственное разрешение измерительной системы. На основе такого изображения невозможно провести измерения скорости жидкости в остаточном слое.

Для исследования наблюдаемых особенностей изображения был проведен простой анализ хода лучей на основе геометрической оптики. Для простоты считалось, что камера расположена на большом расстоянии от объекта, и лучи, идущие к ней, можно считать параллельными друг другу и ортогональными к стенке короба. Для луча, идущего к каждому «пикселю» виртуальной камеры, были определены координаты: точки пересечения луча с внешней поверхностью трубы, точки пересечения преломленного луча с внутренней поверхностью трубы и точки пересечения повторно преломленного луча с лазерной плоскостью (т.е., вертикальной плоскостью, проходящей через центр трубы). Внутренность трубы в этом приближенном расчете полагалась заполненной жидкостью. Углы преломления рассчитывались по закону Синелиуса. Коэффициенты преломления полагались равными 4/3 для воды и 3/2 для оргстекла.

На рис. 3(а) приведен расчет хода лучей с шагом по *y*-координате 0,1 мм. Для удобства представления показан расчет в верхней части канала, расчет для нижней половины будет идентичным. Красным показаны лучи в воде, синим – в оргстекле. Черным показаны лучи, не доходящие до лазерной плоскости: часть из них испытыват полное внутреннее отражение на границе оргстекло-вода,

часть проходит в воду, однако из-за преломления снова попадает на внутреннюю стенку.

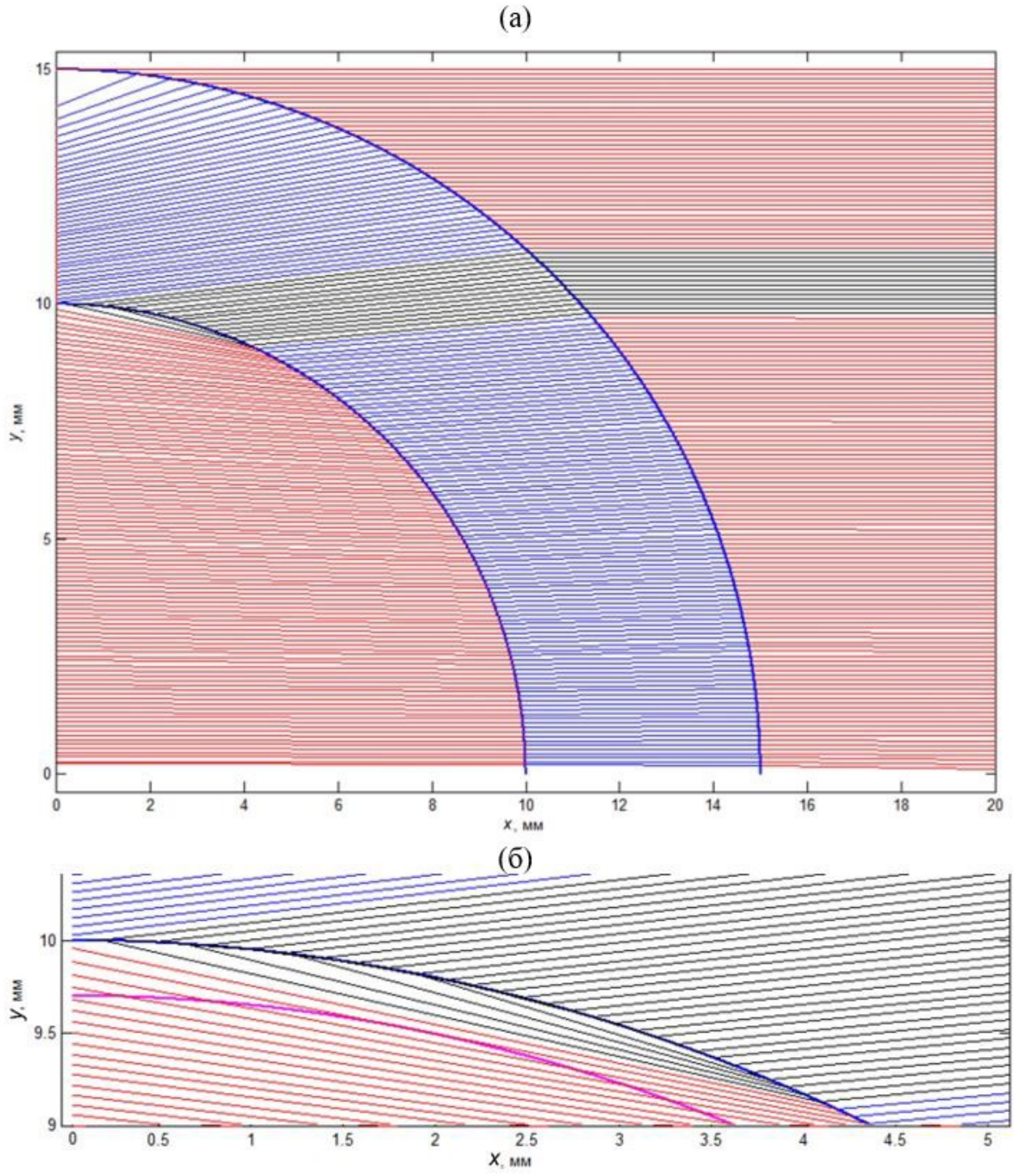


Рис. 3. Расчет хода лучей для конфигурации 1(а):
(а) – полное изображение четверти трубы; (б) – увеличенный фрагмент в интересующей области. Красным обозначены лучи в жидкости, синим – в оргстекле, черным – лучи, не попадающие в камеру и/или в освещенное лазером сечение жидкости. Толстые синие линии обозначают границы оргстекла, толстая розовая линия – поверхность пленки с толщиной 0,3 мм

Увеличенный фрагмент вблизи исследуемой пленки жидкости показан на рис. 3(б). Здесь лучи прорисованы с шагом 0,05 мм. Видно, что интересующая нас пристенная область не находится в «слепой зоне» – до нее доходят лучи, обозначенные красным цветом, которые передают изображение в камеру, в области под пучком черных лучей (см. рис. 3а). Тем не менее, существуют два ограничения. Во-первых, изображение пристенной области сжато по координате *y*. В области 0,5 мм от стенки изображение сжато примерно в 1,5 раза (на рис. 3б в интервале *y* от 9,5 до 10 мм расположено чуть больше 7 интервалов между лучами, вместо десяти, соответствующих шагу отрисовки). Во-вторых, в случае тонких пленок большинство интересующих нас лучей пересекает межфазную поверхность (последняя обозначена более толстой розовой линией на рис. 3б для случая толщины пленки 0,3 мм). В результате соответствующие пиксели останутся темными. Для пленки в 1 мм недооценка толщины пленки составит лишь 6 %, однако для толщины 0,25 мм изображение пленки пропадет полностью. С учетом того, что толщина пленки неравномерна по азимутальной координате (вариация вследствие действия силы тяжести, трехмерные волны, захваченные пузырьки и т.д.), более толстые пленки могут также остаться невидимыми для камеры.

Также становится понятным появление отраженных изображений трассеров в темной области: «черные» лучи, проникающие в пленку, но попадающие на твердую стенку, после повторного отражения могут достигнуть освещенного сечения. Из-за малого угла падения коэффициент отражения будет достаточным, чтобы яркие трассеры были различимы.

Этих проблем можно избежать, изменив расположение короба, лазера и камеры (см. рис. 1(б)). На рис. 4 представлен пример расчета в окрестности исследуемого сечения пленки жидкости при угле наклона короба 20°. В остальном рисунок аналогичен рис. 3(б). В этом случае все еще есть лучи, испытывающие полное внутреннее отражение (при угле 22° такие лучи исчезают). Вблизи стенки остается слепая зона толщиной в 10 мкм (отсутствует при 22°), которой можно пренебречь. Теперь лучи, несущие изображение пленки в камеру, не пересекают межфазную поверхность. Кроме того, изображение пленки теперь увеличено (в 1,5 раза для пленки толщиной 0,5 мм), что улучшает пространственное разрешение.

Расположение измерительной системы под углом несет также и недостатки. При наклонном расположении мишени относительно плоскости камеры пространственное разрешение ухудшается пропорционально косинусу угла наклона. Однако такое ухудшение частично компенсируется описанным выше увеличением изображения пленки. Также можно было ожидать различия в расстоянии от точки измерений до матрицы камеры для разных участков пленки пропорционально синусу угла наклона, что потребует большей глубины резкости. Однако расчеты показывают, что это различие частично компенсируется кривизной трубы. Так, для толщины пленки 1 мм при угле 30° различие в длине оптического пути не превышает 0,35 мм, вместо ожидаемых 0,5 мм.

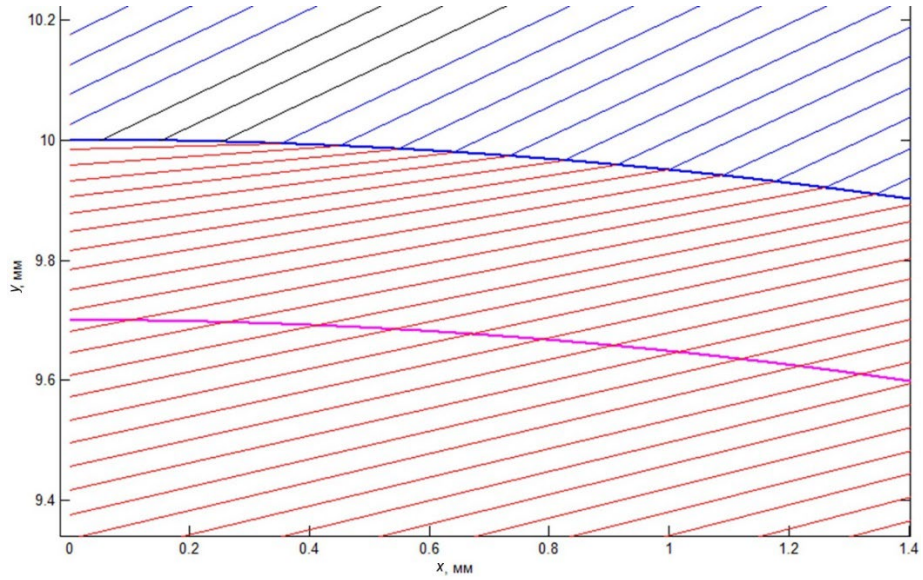


Рис. 4. Фрагмент расчетной схемы хода лучей в окрестности освещенного участка пленки жидкости при угле наклона короба 20° к горизонту. Обозначения те же, что на рис. 3

Заключение

Получены тестовые снимки трассерных частиц в пленке жидкости, текущей совместно с высокоскоростным потоком газа в горизонтальной трубе. Для корректной интерпретации изображений проведен анализ хода лучей. Выявлены причины исчезновения изображения пленки при низких толщинах, а также появления других оптических артефактов. Предложена и обоснована конфигурация экспериментального оборудования с наклонным расположением оптического короба, камеры и лазера, устраняющая такие искажения и повышающая достоверность измерений.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН №126021217059-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cherdantsev, A.V., An, J.S., Charogiannis, A., Markides, C.N., 2019. Simultaneous application of two laser-induced fluorescence approaches for film thickness measurements in annular gas-liquid flows. Int. J. Multiph. Flow, 119, 237–258.

2. Zadrazil, I., Markides, C.N., 2014. An experimental characterization of liquid films in downwards co-current gas–liquid annular flow by particle image and tracking velocimetry. Int. J. Multiph. Flow, 67, 42–53.

3. Ashwood, A.C., Hogen, S.V., Rodarte, M.A., Kopplin, C.R., Rodríguez, D.J., Hurlburt, E.T., Shedd, T.A., 2015. A multiphase, micro-scale PIV measurement technique for liquid film velocity measurements in annular two-phase flow. Int. J. Multiph. Flow, 68, 27–39.

4. Hann, D.B., Cherdantsev, A.V., Azzopardi, B.J., 2018. Study of bubbles entrapped into a gas-sheared liquid film. Int. J. Multiph. Flow, 108, 181–201.

5. Zdornikov, S.A., Isaenkov, S.V., Cherdantsev, A.V., 2024. Axial and azimuthal development of disturbance waves in annular flow in a horizontal pipe. Int. J. Multiph. Flow, 172, 104704.

© А. В. Черданцев, Л. П. Трубицына, А. З. Квон, 2026

УДК 532.59
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-120-127

А. В. Бобылев[1]✉, В. В. Гузанов[1], А. В. Черданцев[1]

Компенсация оптических искажений при измерении толщины пленки на боковой поверхности цилиндра

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

Аннотация. Работа посвящена экспериментальному исследованию структуры пленки жидкости, стекающей по боковой поверхности горизонтального цилиндра под действием силы тяжести. Полевые измерения толщины пленки жидкости с использованием метода LIF проведены для случая, когда ось оптической системы измерения располагается в горизонтальной плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. Анализ оптических искажений, связанных с существенной кривизной наблюдаемого объекта, позволил разработать автоматический алгоритм коррекции калибровки метода LIF и оптической дисторсии регистрируемых изображений.

Ключевые слова: стекающие пленки жидкости, волновое движение, метод LIF, компенсация искажений

A. V. Bobylev[1]✉, V. V. Guzanov[1], A. V. Cherdantsev[1]

Compensation of optical distortions in the film thickness measuring on the side of cylinder surface

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

Abstract. The work is devoted to an experimental study of the liquid film structure flowing down the lateral surface of a horizontal cylinder under the influence of gravity. Field measurements of the liquid film thickness using the LIF method were carried out for the case when the axis of the optical measurement system is located in the horizontal plane perpendicular to the axis of the cylinder. The analysis of optical distortions associated with the significant curvature of the observed object made it possible to develop an automatic algorithm for correcting the calibration of the LIF method and optical distortion of the recorded images.

Keywords: falling liquid film, wave motion, LIF method, distortion compensation

Введение

Интерес к течению пленки жидкости по криволинейной поверхности обусловлен широким распространением в различных технологиях тепло и массообменных пленочных аппаратов с горизонтальными трубами. Несмотря на долгую историю исследования работы таких аппаратов и общее понимание, что характеристики пленочного течения на поверхности трубы играют определяющую роль в процессах переноса, волновые характеристики пленок, стекающих по трубам, остаются малоизученными. Наиболее информативным экспериментальным методом исследования пленочного обтекания цилиндрических поверхностей остается метод опти-

ческой визуализации. Так, в [1] использовали скоростную видеосъемку для изучения характера пленочного течения на наружной поверхности трубы, а в [2] для изучения течения пленки жидкости по пакету горизонтальных цилиндров. В силу сложности геометрии распределение толщины пленки на цилиндре экспериментально изучалось в немногочисленных работах. Так в [3] изучалось распределение толщины пленки вокруг труб разного диметра с помощью контактного датчика перемещений. В работах [4-7] толщина пленки измерялась методом ПЛИФ, с использованием лазерного ножа, освещающего пленку параллельно оси трубы. Метод измерения LIF (Laser Induced Fluorescence), основанный на восстановлении локальной толщины пленки по яркости свечения, растворенного в рабочей жидкости флуорофора, предложенный в работе [8], в настоящее время является основным и наиболее эффективным инструментом для получения мгновенных распределений толщины волновой пленки жидкости. Возможности метода LIF привлекли большое внимание, и позже многие исследователи применили LIF для изучения 3D-волн на вертикальных или наклонных пленках, движущихся под действием силы тяжести [9-14]. Подробное описание метода LIF, включая принцип его работы, процедуру калибровки и пространственные конфигурации систем измерения авторы данной работы представили в обзорной статье [15]. Следует отметить, что в настоящее время в литературе отсутствуют экспериментальные исследования волновых режимов течения пленки жидкости на боковой поверхности горизонтального цилиндра.

Экспериментальный стенд и метод измерения

Для исследования сплошного пленочного течения на боковой поверхности горизонтального цилиндра был спроектирован и собран экспериментальный стенд, представляющий из себя замкнутый гидродинамический контур, состоящий из рабочего участка, основного бака с рабочей жидкостью, насоса и бака постоянного уровня, соединенных между собой гибкими силиконовыми шлангами. Рабочая жидкость закачивается насосом в бак постоянного уровня, откуда через систему регулировки расхода и электродинамический модулятор расхода жидкости поступает на рабочий участок. В качестве рабочей жидкости использовался водоглицериновый раствор (ВГР). Рабочий участок представляет собой прозрачную оргстеклянную трубу с внешним диаметром d_1=7,96 см, внутренним диаметром d_2=6,94 см и длиной 50 см, рис.1,а.

Орошение рабочего участка проводится посредством распределителя, положение которого относительно цилиндра регулируется в трех направлениях. Эксперименты проводились с некоторым смещением оросителя в сторону от плоскости, проходящей через ось цилиндра, с тем чтобы весь объем рабочей жидкости стекал по одной стороне цилиндра, рис.1,а.

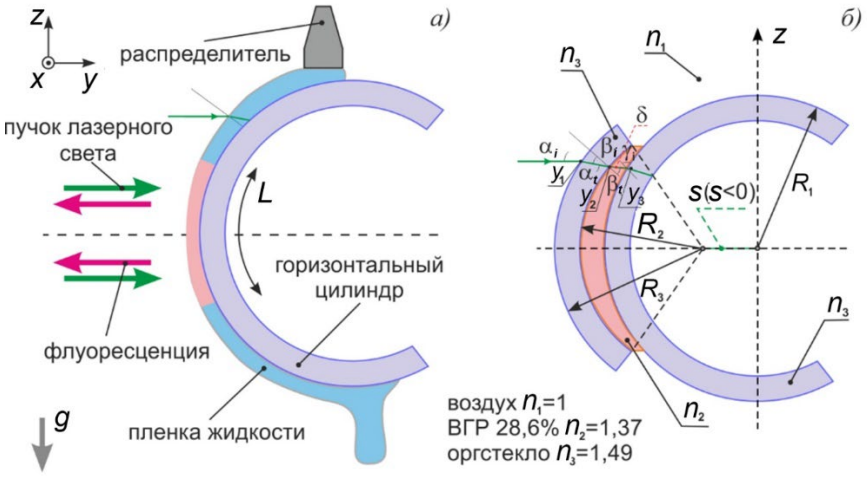


Рис. 1. Схема эксперимента в плоскости поперечного сечения цилиндра *а)* и калибровка метода LIF сегментом трубы, идентичной трубе рабочего участка *б)*

Сплошное пленочное течение было сформировано с использованием гидрофильных нитей, натянутых на боковой поверхности цилиндра по обе стороны от распределителя до нижней части цилиндра. В этом случае контактные линии раздела пленки жидкости удерживаются гидрофильными нитями, и пленочное течение сохраняет постоянную ширину. Таким образом было сформировано сплошное пленочное течение шириной D=11,3 см. Наблюдения режимов течения проводились в диапазоне чисел Рейнольдса жидкости $10 \le Re \le 30$. Здесь $Re = Q/\nu D$, где Q – объемный расход жидкости, а ν – кинематическая вязкость. Для использованного ВГР с концентрацией глицерина C=28,6%, значение вязкости соответствовало $\nu = 2{,}32 \cdot 10^{-6}$ м^2/с при температуре 18,6°С.

В рассмотренном диапазоне чисел Re на свободной поверхности не наблюдаются режимы с естественным волнообразованием, но реализуются режимы с искусственно возбужденными регулярными волнами. Регулярные волны на входе в распределитель возбуждаются электродинамическим модулятором в диапазоне частот $8 < F < 32$ Гц. Волновое движение на поверхности пленки становится визуально заметным в верхней области цилиндра, которая соответствует азимутальному углу к горизонту в поперечном сечении цилиндра $\theta \approx 45°$.

Измерения поля толщины пленки жидкости проводились методом LIF. Принцип метода заключается в следующем: в рабочей жидкости растворяется флуорофор в известной концентрации. В наших экспериментах использовался Родамин 6Ж в концентрации 10 мг/л. Область наблюдения освещается лазером, флуорофор в рабочей жидкости поглощает излучение и через короткий интервал времени (~1 нс) переизлучает свет другого спектрального состава. Исследуемый участок регистрируется камерой со светофильтром, который отсекает возбуждающее лазерное излучение и пропускает переизлученный флуорофором свет (рис.1,а). В каждой точке яркость изображения рабочей жидкости пропорциональна локальной толщине жидкости. Экспериментальная зависимость между

интенсивностью флуоресценции и толщиной пленки хорошо описывается формулой, см. [15]:

$$J(x,z) = C(x,z) \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot h(x,z)}) \times (1 + K(x,z) \cdot e^{-\alpha \cdot h(x,z)}) + D(x,z), \qquad (1)$$

где α – коэффициент поглощения возбуждающего света; K (x, z) – показатель отражения света от межфазной границы жидкость-стекло; D (x, z) – темновой уровень камеры; $C(x, z)$ – корректирующая матрица, введенная для компенсации неравномерности освещения в области измерения и разницы в чувствительности пикселей камеры. Определение связи между яркостью изображения и толщиной при известном коэффициенте поглощения рабочего раствора производится калибровкой по слою заданной толщины непосредственно при условиях, при которых проводится эксперимент (рис. 1, б). Взаимное расположение лазера, камеры и области наблюдения должны совпадать при проведении калибровки и экспериментов, поскольку при изменении их взаимного расположения матрица передаточных коэффициентов C (x, z) будет изменяться. Компенсация флуктуаций яркости лазерного излучения во времени проводилась с использованием фотометрической кюветы, заполненной жидкостью с флуорофором. Кювета располагалась на периферии в границах регистрируемой области. Яркость изображения кюветы зависит только от интенсивности лазерного излучения. По значению данной яркости проводилась нормализация яркости каждого изображения.

Создать для проведения калибровки слой жидкости постоянной толщины на боковой поверхности цилиндра достаточно сложно, поэтому были рассмотрены несколько вариантов создания слоя постоянной толщины в продольном направлении и переменной толщины в поперечном направлении. Один из способов организации калибровочного слоя состоит в использовании сегментов прозрачных труб подходящего внутреннего диаметра. В наших экспериментах был использован сегмент в одну четверть трубы, идентичной трубе рабочего участка, см. рис. 1, б. Сегмент прозрачной трубы с продольным размером 15 см прижимался через напечатанные из пластика переходники к поверхности рабочего участка. Сегмент с переходниками были собраны в жесткую конструкцию, которая удобно устанавливается и удаляется во время эксперимента. Разброс толщин калибровочного слоя в этом случае, составил от 1,12 мм на периферии до 2,9 мм в плоскости оси цилиндра и оси оптической системы измерения. Получившийся слой располагался в области проведения измерений и заполнялся рабочей жидкостью. Освещение и регистрация свечения данного слоя проводились строго при тех же условиях, что и при проведении эксперимента. По изображениям калибровочного слоя проводилось вычисление матриц передаточных коэффициентов C (x, z). Как видно из рис. 1, б, наличие сегмента прозрачной трубы изменяет ход лучей зондирующего излучения лазера, вследствие чего возникает необходимость модификации полученной непосредственно в эксперименте корректирующей матрицы C (x, z). Она включает в себя нелинейное смещение коэффициентов C (x, z) по оси z при применении матрицы C (x, z) для восстановления толщины пленки по полученной яркости регистрируемого изображения J (x, z), рис.

1,б. Кроме того, должна быть применена модификация значений матрицы $C(x, z)$, отражающая изменение яркости, связанное с коэффициентами прохождения на межфазных поверхностях воздух-огрстекло и оргстекло-ВГР, и коэффициентами фокусировки зондирующих лучей вследствие криволинейности межфазных поверхностей раздела. Отметим, что все эти коэффициенты имеют сильную зависимость от угла падения зондирующего луча на поверхность прозрачного сегмента трубы. Перед восстановлением толщины по формуле (1) также требуется модификация яркости регистрируемых изображений пленки $J(x, z)$, что связано с коэффициентами прохождения на межфазной поверхности воздух-ВГР. Все упомянутые коэффициенты могут быть рассчитаны исходя из приближений геометрической оптики и геометрии задачи, рис. 1, б. Модуль автоматического расчета этих поправочных коэффициентов для матриц $C(x, z)$ и $J(x, z)$ был разработан в программной среде Matlab.

Для реализации метода использовалась измерительная система на основе комплекта оборудования для PIV измерений, адаптированного для проведения LIF измерений. Система состоит из сдвоенного импульсного NdYaG лазера и CCD камеры. Перед объективом камеры установлен светофильтр, отсекающий отраженное излучение лазера. Камера регистрирует изображения рабочей области синхронизировано с импульсами лазера. Для регистрации волн в различных частях всей рабочей области для каждого волнового режима частота съемки кадров подбиралась кратной частоте возбуждаемых волн с небольшим отклонением, таким образом, чтобы при каждой последующей регистрации кадра волна смещалась относительно своего положения на предыдущем кадре. В результате обработки каждого исходного изображения получается одно мгновенное поле толщины, а в конечном итоге – набор мгновенных полей толщины в различные моменты времени. Погрешность в определении толщины в разных участках реконструированных полей неодинакова. В области наиболее наклонной поверхности относительно плоскости наблюдения она несколько выше, чем в области, где поверхность цилиндра перпендикулярна оси камеры, но в целом не превышала 8%.

Результаты

Предварительные наблюдения показали, что сплошную пленку жидкости удается сформировать для чисел Рейнольдса $Re \geq 8$. При числах $Re < 8$ сплошное пленочное течение неустойчиво и быстро сворачивается в одиночный ручеек или распадается на ряд неустойчивых струек. Сплошная пленка восприимчива к гармоническим колебаниям расхода, и на ее поверхности появляются волны, развивающиеся вниз по потоку вплоть до срыва в нижней части цилиндра. Форма бегущих волн близка к двумерным волнам, но, как и для пленки, стекающей по плоской пластине, скорость движения ее участков сильно зависит от равномерности орошения. При этом диапазон частотной восприимчивости пленки изменяется с ростом числа Re. Так при $Re=10$ волновое движение визуально наблюдается в диапазоне F от 8 Гц до 24 Гц, а для числа $Re=30$ становится шире, от F=8 Гц до 32 Гц. Исходя из этих данных, тестовые измерения полей толщины пленки жидкости методом LIF были проведены для режимов течения без возбуждения и с возбуждением на частотах F: 8,12,16,20,24,28,32 Гц для чисел

Re=10 и Re=20. В конечном виде после коррекции оптических искажений поля толщины были представлены в виде зависимостей $h(x, L)$ где x – продольная координата, а L – длина наблюдаемой дуги цилиндра в попереченом сечении, рис.1,а.

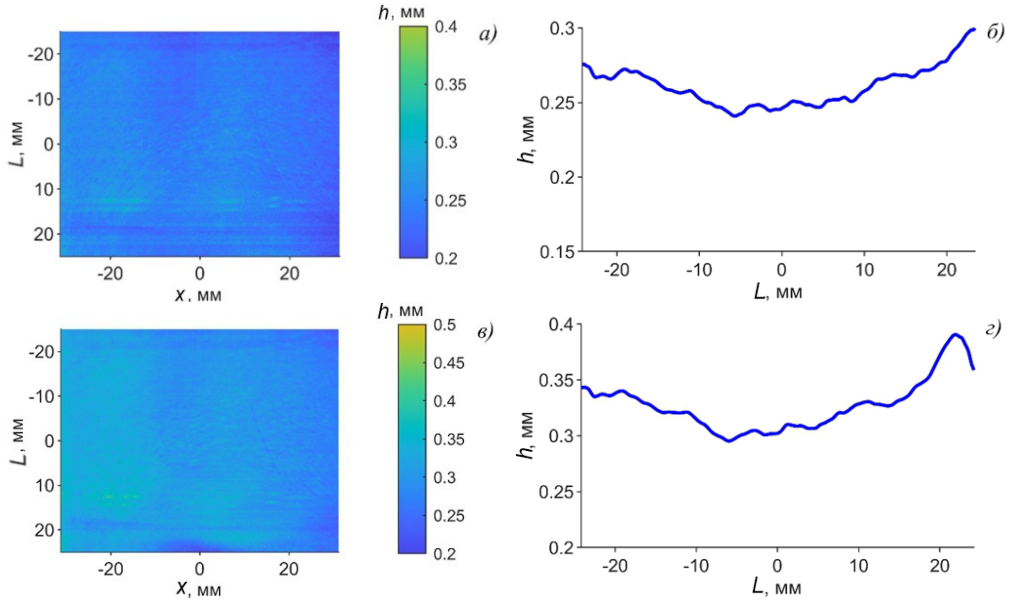


Рис. 2. Поля толщины пленки жидкости в отсутствие возбуждения регулярных волн и профили толщины в поперечном направлении при x=0 мм. *а), б)* Re=10, F=0 Гц, *в), г)* Re=20, F=0 Гц.

В ходе экспериментов получены поля толщин на части боковой поверхности горизонтального цилиндра с внешним диаметром d_1=79,6 мм. Размер полей толщины в плоскости наблюдения в продольном направлении был равен 6 см. Размер области в поперечном направлении, равный 4,8 см, соответствовал дуге окружности цилиндра длиной L=5 см и азимутальному углу равному θ=72°. Анализ полученных полей толщины показал, что средняя толщина в продольном направлении, как гладкой, так и волновой пленки имеет минимум при движении в поперечном направлении, в точке, где пленка течет практически вертикально, см. рис. 2. Для большинства зафиксированных двумерных волновых режимов амплитуда волн постоянно растет вниз по потоку, см. рис. 3. Наблюдались различные формы волн, от синусоидальных до развитых крупных волн с заметным капиллярным предвестником. Кроме того, наблюдались волны с заполненными гребнями и заостренными впадинами.

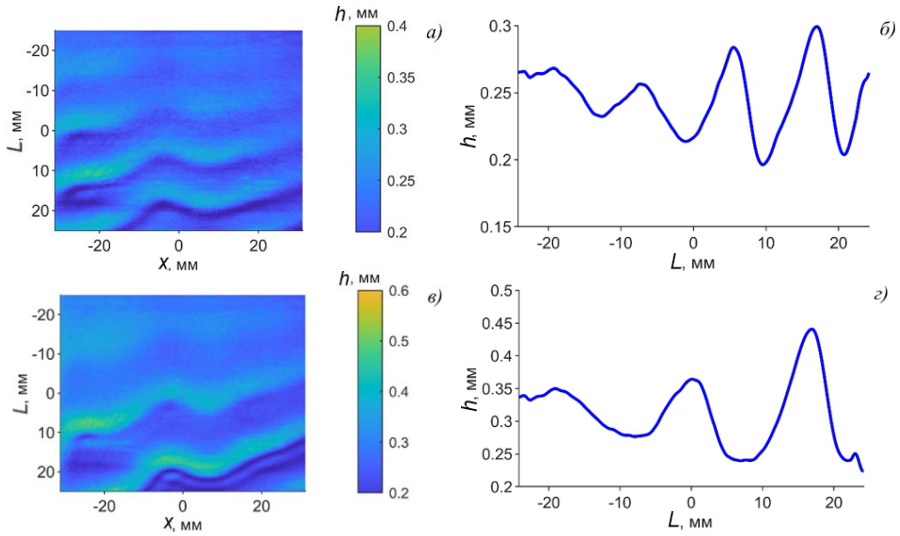


Рис. 3. Поля толщины пленки жидкости при возбуждении регулярных волн и профили толщины в поперечном направлении при x=0 мм. *а), б)* Re=10, F=16 Гц, *в), г)* Re=20, F=16 Гц.

Заключение

Сконструирован стенд по исследованию пленочного течения боковой поверхности горизонтального цилиндра методом LIF. Рассмотрены различные калибровочные конфигурации метода LIF для оценки компенсации оптических искажений. В эксперименте реализована калибровка метода LIF сегментом трубы, идентичной трубе рабочего участка. Программно учтены нелинейные смещения локальных областей регистрируемых изображений пленочного течения и калибровочного слоя в зависимости от угла падения зондирующего излучения. Значения яркости локальных областей изображений модифицированы посредством поправочных коэффициентов, связанных с прохождением и фокусировкой зондирующего света через межфазные поверхности раздела.

Эксперименты показали, что сплошная пленка жидкости формируется для чисел Рейнольдса Re≥8. Получены поля толщин с двумерными волнами на части боковой поверхности горизонтального цилиндра. Анализ показал, что средняя толщина в продольном направлении, как гладкой, так и волновой пленки имеет минимум в точке, где пленка течет практически вертикально. Амплитуда зафиксированных волновых режимов постоянно растет вниз по потоку. Наблюдались различные формы волн: от синусоидальных до развитых крупных волн с капиллярным предвестником.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН №126021217059-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Killion J. D., Garimella S. Gravity-driven flow of liquid films and droplets in horizontal tube banks //International Journal of Refrigeration. – 2003. – Т. 26. – №. 5. – С. 516-526.

2. Jafar F., Thorpe G., Turan O. F. Liquid film falling on horizontal circular cylinders //16th Australasian fluid mechanics conference. – Queensland, Australia: Gold Coast, 2007. – Т. 2. – С. 1193-1199.

3. Hou H. et al. Distribution characteristics of falling film thickness around a horizontal tube //Desalination. – 2012. – Т. 285. – С. 393-398.

4. Gstoehl D. et al. Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using a laser measurement technique //Heat transfer engineering. – 2004. – Т. 25. – №. 8. – С. 28-34.

5. Chen X. et al. Measurement on falling film thickness distribution around horizontal tube with laser-induced fluorescence technology //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Т. 89. – С. 707-713.

6. Desevaux P. et al. Interface measurement technique for liquid film flowing inside small grooves by laser induced fluorescence //Applied thermal engineering. – 2002. – Т. 22. – №. 5. – С. 521-534.

7. Wang X. et al. Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using laser-induced fluorescence technique //Journal of Physics: Conference Series. – 2009. – Т. 147. – №. 1. – С. 012039.

8. Liu J., Paul J. D., Gollub J. P. Measurements of the primary instabilities of film flows //Journal of Fluid Mechanics. – 1993. – Т. 250. – С. 69-101.

9. Adomeit P., Renz U. Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films //International journal of multiphase flow. – 2000. – Т. 26. – №. 7. – С. 1183-1208.

10. Vlachogiannis M., Bontozoglou V. Observations of solitary wave dynamics of film flows //Journal of Fluid Mechanics. – 2001. – Т. 435. – С. 191-215.

11. Leontidis V. et al. Nominally two-dimensional waves in inclined film flow in channels of finite width //Physics of Fluids. – 2010. – Т. 22. – №. 11.

12. Kharlamov S. M. et al. The transition from two-dimensional to three-dimensional waves in falling liquid films: Wave patterns and transverse redistribution of local flow rates //Physics of Fluids. – 2015. – Т. 27. – №. 11.

13. Guzanov V. V. et al. Characterization of 3-D wave flow regimes on falling liquid films //International Journal of Multiphase Flow. – 2018. – Т. 99. – С. 474-484. Int. J. Multiph. Flow 99, 474–484.

14. Бобылев А. В. и др. Волновая структура пленок жидкости при переходе к турбулентному режиму течения //Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45. – №. 15. – С. 10-13.

15 Cherdantsev A. et al. Measuring liquid film thickness based on the brightness level of the fluorescence: Methodical overview //International Journal of Multiphase Flow. – 2023. – Т. 168. – С. 104570.

© А. В. Бобылев, В. В. Гузанов, А. В. Черданцев, 2026

УДК 532.59
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-128-131

А. З. Квон[1]✉, В. В. Гузанов[1], А. В. Черданцев[1]

Трехмерные измерения скорости в волновом ручейке с использованием камеры светового поля

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

Аннотация. В работе представлены результаты трехмерных измерений скорости в волновом ручейке, стекающем по наклонной поверхности (60°). Исследована структура регулярных трехмерных нелинейных волн при числе Рейнольдса 68. С помощью камеры светового поля одновременно получены форма волны и поле скорости, используя методы лазерно индуцированной флуоресценции и цифровой трассерной анемометрии. Показаны основные элементы течения в трехмерной волне, включая области поперечных потоков жидкости и возвратные течения.

Ключевые слова: ручейковое течение, нелинейные волны, PTV, камера светового поля

A. Z. Kvon[1]✉, V. V. Guzanov[1], A. V. Cherdantsev[1]

Three-dimensional velocity measurements in wavy rivulet using light field camera

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

Abstract. Results on three-dimensional velocity measurements in a wavy rivulet flowing down an inclined plate (60°) are presented. Structure of regular three-dimensional waves is studied at Reynolds number 68. Using a light field camera, the waveform and velocity fields were simultaneously obtained using laser-induced fluorescence and particle tracking velocimetry methods. Key features of the currents in the wave were revealed, including transverse flows and backflows.

Keywords: rivulet flow, nonlinear waves, PTV, light field camera

Введение

Ручейковое (ривулетное) течение – это гравитационное течение узкого слоя жидкости вдоль твердой поверхности, где берегами ручейков являются контактные линии между жидкой пленкой и твердой подложкой. Такие течения формируются, например, на слабосмачиваемых поверхностях или при недостаточном для полного орошения расходе жидкости. В условиях нагрева поверхности стекающая по ней пленка жидкости может разрываться с образованием ручейков благодаря термокапиллярной неустойчивости [1]. Во многих индустриальных приложениях встречаются ручейки, стекающие по или под поверхностями сложной геометрии, часто сопровождающиеся обдувом газа, уносом жидкой фазы, образованием волновых структур и т.д.

Теоретическое описание нелинейных волновых процессов при пленочном, и, в частности, при ручейковом течении является трудной задачей, для решения которой необходимы экспериментальные данные, как о форме свободной поверхности, так и о распределении скорости в ручейке. Одним из немногих методов, обеспечивающих такого рода измерения, является комбинированный подход с использованием камеры светового поля, объединяющий методы лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) и цифровой трассерной анемометрии (PTV) [2]. Целью данной работы являлось получение трехмерных полей скорости в волновом ривулете с привязкой к форме поверхности.

Методы и материалы

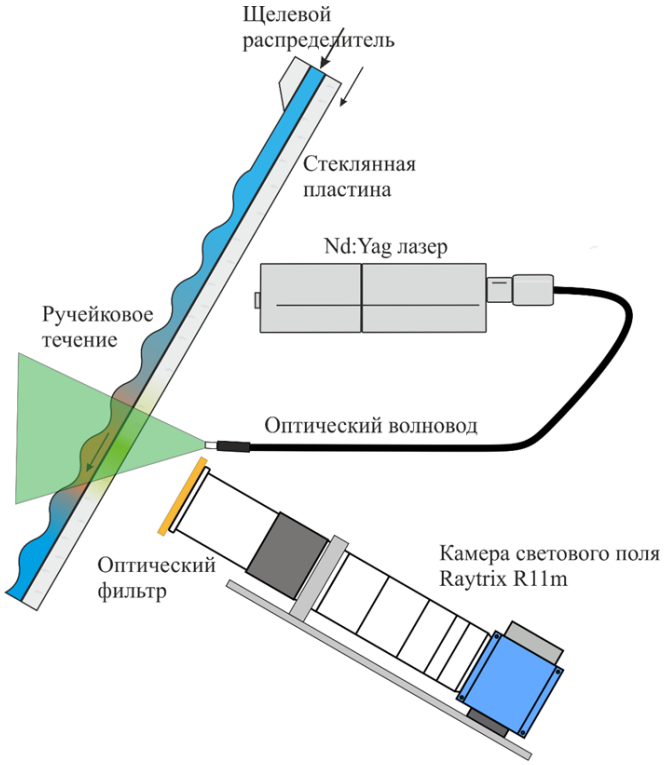


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и компоновка измерительной системы

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

Ручеек шириной $d = 6$ мм формировался с помощью щелевого распределителя на закрепленной под углом 60° относительно горизонта стеклянной пластине (20 × 70 см). Поток ограничивался предварительно нанесенными гидрофобными берегами. Регулярные трехмерные волны возбуждались гармонической модуляцией расхода жидкости с частотой $F = 12$ Гц. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода (кинематическая вязкость $\nu = 0{,}96 \cdot 10\text{-}6$ м2/с, плотность $\rho =$ 998 кг/м3, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 73 \cdot 10\text{-}3$ Н/м) при температуре $T = 23{,}5°$ С. Эксперименты проводились при числе $\mathrm{Re} = 68$, где $\mathrm{Re} = Q/dv$, Q – объемный расход жидкости.

Для одновременного измерения формы свободной поверхности ручейка и объемных распределений скорости на основе камеры светового поля Raytrix R11m использовался комбинированный метод диагностики пленочных течений, включающий в себя ЛИФ и PTV измерения. Принцип PTV основан на измерении скорости по смещению трассеров на двух последовательных кадрах, снятых с известным временным интервалом. При измерениях ЛИФ толщина слоя жидкости определяется по интенсивности ее флуоресценции. Для этого в рабочую жидкость предварительно добавляется флуоресцентный краситель Родамин 6Ж. Флуоресценция возбуждается импульсным лазером (λ = 532 нм), а установленный на камере светофильтр отсекает возбуждающее излучение, поскольку пик флуоресценции приходится на 565 нм.

Ключевой особенностью камеры светового поля является многолинзовый массив, установленный перед светочувствительной матрицей [3]. Помимо пространственного распределения яркости, полученные изображения содержат информацию о направлении падающих световых лучей. При использовании камеры светового поля для PTV становится возможным определить мгновенное положение трассеров в объеме и построить объемное поле скорости.

В ходе эксперимента из полученных изображений камеры светового поля извлекалось распределение яркости флуоресценции окрашенной жидкости и координаты (X ,Y, Z) частиц. С помощью ЛИФ-алгоритмов из распределения яркости восстанавливалась толщина пленки, а из данных по положению частиц строились поля скорости.

Поток засеивался полиамидными трассерами-частицами диаметром 5 мкм с флуоресцентным покрытием (4 мг/л), а для ЛИФ измерений добавлялся флуоресцентный краситель Родамин 6Ж с концентрацией 1 мг/л.

Пространственное разрешение используемой измерительной системы составляло 6,7 мкм/пикс, а размер регистрируемой области 13,5 × 9 мм. Съемка проводилась в двухкадровом режиме с временным интервалом между кадрами dt = 160 мкс. Частота съемки синхронизировалась с частотой генерации волн, что позволило регистрировать трехмерные волны в одной фазе. Каждая серия состояла из 150 – 200 пар изображений.

Результаты

Примеры полученных полей скорости представлены на рис. 2а и рис. 2б. Скорость была получена во всем измеряемом объеме, и можно наблюдать, что поле скорости кореллирует со структурными элементами волны. Яркость фона соотвествует локальной толщине пленки жидкости. Всего было построено 13 слоев с шагом 25 мкм. Общая структура течения подобна структуре, характерной для регулярной трехмерной волны на гладкой пленке [2]. Можно наблюдать пространственно разделенные области поперечных притока и оттока жидкости под гребнем основной волны, области возвратных течений и области течения жидкости вдоль минимума капиллярного предвестника. Скорость в области возвратного течения может достигать значений до –6 см/с. Продольная компонента скорости растет при удалении от стенки и достигает значений ~70 см/с в верхней части волны. Профиль скорость под пиком волны, представленный на рис. 2б, в

области максимальных толщин слабо меняется и более заполнен по сравнению с параболическим, что согласуется с экспериментальными данными по двухмерных волнам [4].

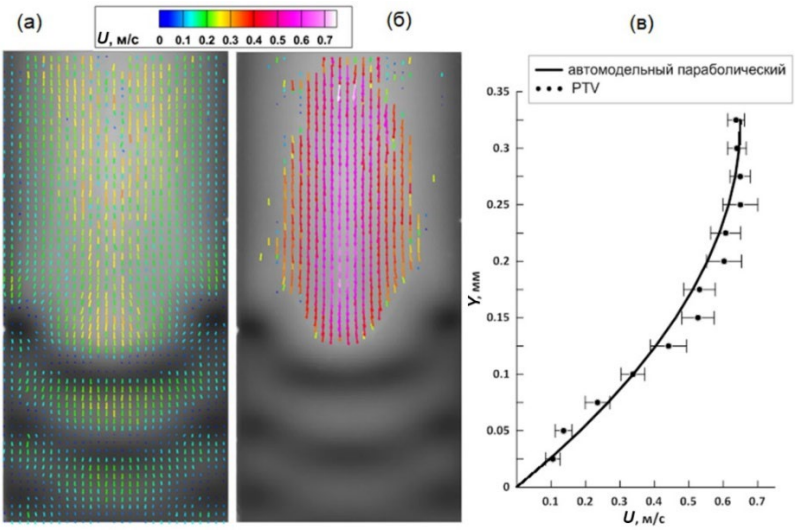


Рис. 2. Поля скорости на расстоянии (а) 150 ± 25 мкм и (б) 300 ± 25 мкм от стенки; (в) – профиль продольной компоненты скорости под пиком волны

Заключение

Получены трехмерные поля скорости в волновом ривулете, стекающем по наклонной пластине. Показаны ключевые элементы течений в трехмерной волне, области поперечных перетоков и возвратных течений. Построены профили продольной компоненты скорости, и показано, что профиль скорости под пиком волны хорошо апроксимируется параболическим профилем, хотя и является более заполненным.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН №126021217059-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pavlenko A.N., Surtaev A.S. 2010. Development of crisis phenomena in falling wavy liquid films at nonstationary heat release. Microgravity Science and Technology, 22, № 2, 215–221.

2. Kvon A.Z., Kharlamov S.M., Bobylev A.V., Guzanov V.V. 2022. Investigation of the flow structure in three-dimensional waves on falling liquid films using light field camera . Experimental Thermal and Fluid Science, 132, 110553.

3. Georgiev T., Lumsdaine A. Resolution in plenoptic cameras // Optics InfoBase Conference Papers. 2009.

4. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Alekseenko S.V., Orlov V.V. 1977. Instantaneous velocity profile in a wavy fluid film. Journal of Engineering Physics, 33, № 3, 1012–1016.

© А.З. Квон, В. В. Гузанов, А. В. Черданцев, 2026

УДК 532.5
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-132-135

Л. П. Трубицына[1]✉, А. В. Черданцев[1]

Метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции для исследования срыва капель с поверхности жидкости

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

Аннотация. Срыв капель с поверхности жидкости исследуется для случая течения воды и водно-глицеринового раствора в плоском горизонтальном канале. Показано, что метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции позволяет проследить эволюцию волны быстрой ряби на поверхности жидкой пленки от зарождения до разрыва на капли. Метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции является перспективным для исследования волновых течений в тонких пленках.

Ключевые слова: дисперсно-кольцевое течение, стереоскопическая лазеро-индуцированная флуоресценция, срыв капель

L. P. Trubitsyna[1]✉, A. V. Cherdantsev[1]

Stereoscopic laser-induced fluorescence for studying droplet entrainment in liquid flows

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

Abstract. Droplet entrainment is studied for water and water-glycerol solution flow in a flat horizontal channel. It is shown that stereoscopic laser-induced fluorescence (LIF) makes it possible to trace the evolution of a fast ripple wave on the surface of a liquid film from its inception to its breakup into droplets and to determine the ripple velocity and geometric parameters. Stereoscopic LIF id a promising technique for studying wave flows in thin films.

Keywords: annular flow, stereoscopic laser-induced fluorescence, droplet entrainment

Введение

Срыв капель является частью дисперсно-кольцевого течения тонких пленок жидкости [1]. В таких течениях существуют волны возмущения, которые образуются вследствие слияния мелких первичных волн на входе в канал, движутся с высокой скоростью и существуют продолжительное время [2]. Поверхность волн возмущения покрыта волнами быстрой ряби. Их эволюция и разрушение под воздействием газового потока приводит к срыву капель жидкости с поверхности пленки [3]. Присутствие в течении волн возмущения, капель жидкости в ядре газового потока и захваченных пузырьков газа в толще жидкости увеличивает площадь межфазной поверхности, через которую происходит теплообмен в системе. Поэтому понимание процессов, протекающих в дисперсно-кольцевом

течении, необходимо для моделирования отвода тепла от стенок канала в широком спектре прикладных задач.

Поверхность тонкой пленки, покрытая волнами возмущения, существенно трехмерна, а события (отрыв и падение капель, захват пузырьков, слияние и разрыв волн) характеризуются малыми размерами и временем протекания. Поэтому изучение дисперсно-кольцевых течений требует панорамных методов с высоким пространственным и временным разрешением. Этим требованиям отвечает метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции, который основан на регистрации свечения флуоресцентного красителя, растворенного в рабочей жидкости, при помощи высокоскоростной камеры. Стереоскопическая модификация этого метода позволяет одновременно фиксировать поверхность пленки с разных углов обзора и, таким образом, достигать большей ясности изображения.

Методы и материалы

В данной работе исследуется газожидкостное течение в горизонтальном канале длиной 2 м, шириной 166 мм и высотой 26 мм. Канал выполнен из оргстекла, что позволяет вести видеосъемку течения через прозрачную нижнюю стенку канала. Рабочая жидкость подается на вход канала через распределитель при помощи насоса и увлекается спутным газовым потоком. В качестве рабочих жидкостей взяты дистиллированная вода и 20% водно-глицериновый раствор при комнатной температуре. Эксперименты проводились для чисел Рейнольдса жидкости 105, 210, 360 и 520 и скорости спутного потока газа 16, 25, 30 и 35 м/с Подробное описание установки приведено в [5].

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1.

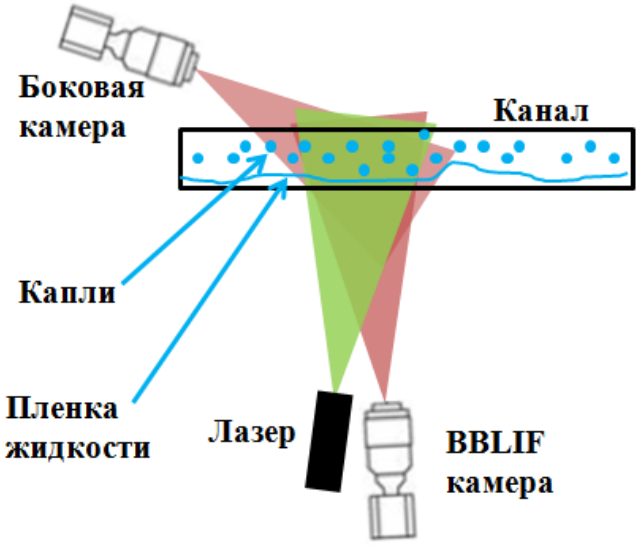


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента

Рабочая жидкость содержит флюорофор (родамин 6G) в концентрации 5 мг/л. Жидкость освещается импульсным лазером с длиной волны 527 нм. Под

воздействием лазера частицы флюорофора испускают излучение, которое регистрируется двумя камерами под разными углами обзора с частотой 5 кГц. Камеры снабжены светофильтрами, которые отсекают излучение лазера, но пропускают излучение флюорофора. Размер области обзора – 52 мм на 20 мм.

Результаты

Получены изображения волны быстрой ряби на поверхности пленки (рис. 2 и 3, волна быстрой ряби выделена черным эллипсом).

Снизу на рисунках приведены изображения, полученные при помощи ЛИФ-камеры. По яркости пикселей изображения можно восстановить толщину пленки жидкости в данной точке. Сверху приведены изображения той же области течения с боковой камеры – они облегчают интерпретацию изображения. Между первым и последним кадром на рисунках прошло около 6 мс. Можно проследить эволюцию волны быстрой ряби от зарождения до разрыва. Хорошо различимы фрагментация фронта волны по типу «парашют» [1] и образование спрея капель. По изображениям можно определить положение волны в каждый момент времени, ее скорость и линейные размеры.

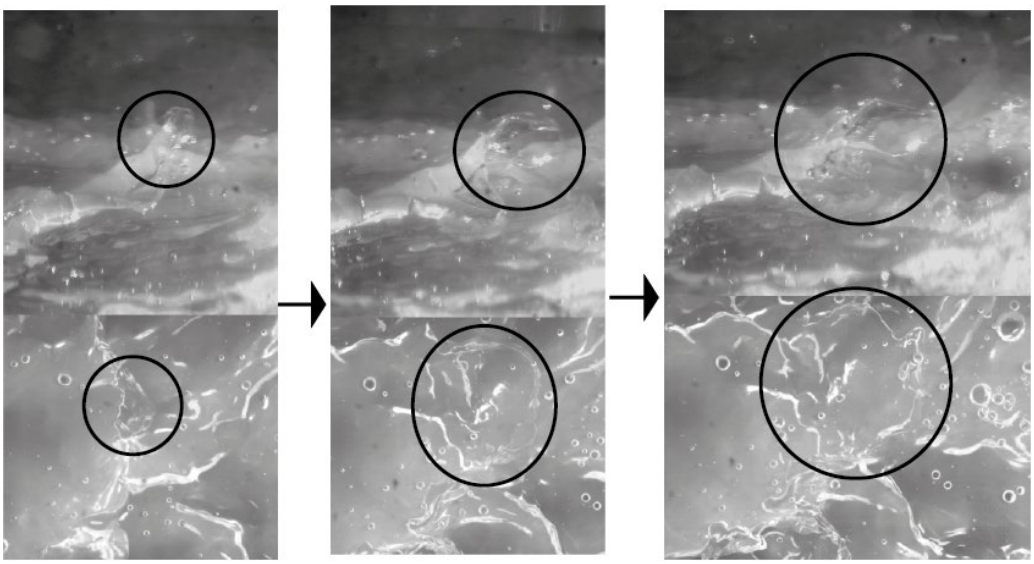


Рис. 2. Эволюция волны быстрой ряби для воды
(скорость спутного потока газа 30 м/с, число Рейнольдса жидкости 520)

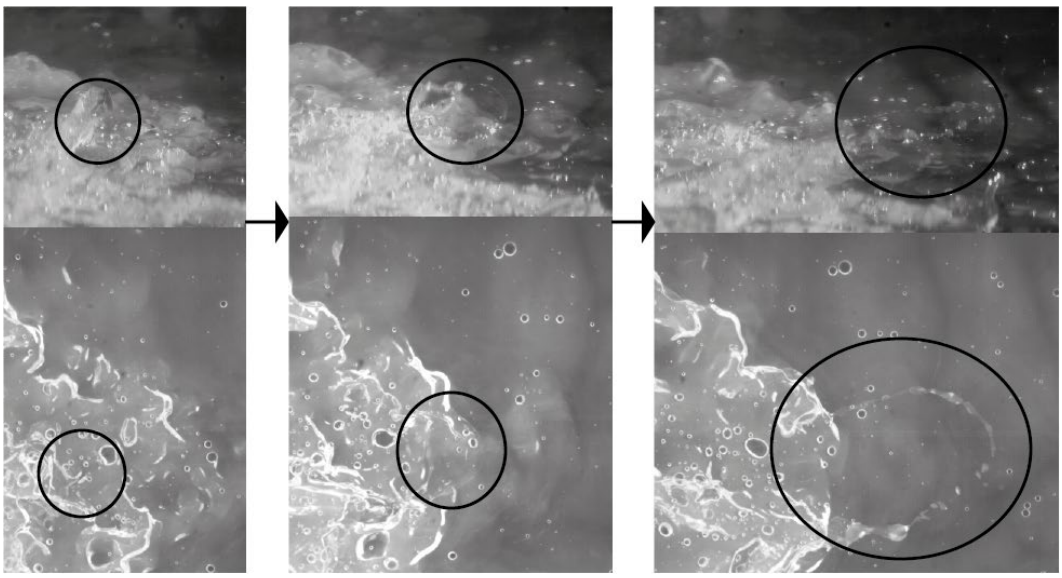


Рис. 3. Эволюция волны быстрой ряби для 20% водно-глицеринового раствора (скорость спутного потока газа 30 м/с, число Рейнольдса жидкости 520)

Заключение

Показано, что метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции позволяет проследить эволюцию волны быстрой ряби на поверхности жидкой пленки от зарождения до разрыва на капли. Стереоскопическая постановка эксперимента существенно облегчает интерпретацию изображений. Метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции является перспективным для исследования волновых течений в тонких пленках.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН №126021217059-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Azzopardi B.J., Drops in annular two-phase flow, Int. J. Multiph. Flow 23 1997 1–53.
2. Alekseenko S.V., Antipin V.A., Cherdantsev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M., Two-wave structure of liquid film and waves interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment. Phys. Fluids, 2009 21, 061701-061704.
3. Alekseenko S.V., Cherdantsev A.V., Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Markovich D.M., Study of formation and development of disturbance waves in annular gas–liquid flow, Int. J. Multiph. Flow. 2015 77 65–75.
4. Cherdantsev A.V., Bobylev A.V., Guzanov V.V, Kvon A.Z., Kharlamov S.M. Measuring Liquid Film Thickness Based on the Brightness Level of the Fluorescence: Methodical Overview, International Journal of Multiphase Flow 2023 168: 104570.
5. Cherdantsev, A.V. Three-dimensional evolution and interaction of disturbance waves on a gas-sheared liquid film on a horizontal plane near the transition region. International Journal of Multiphase Flow, 2023, 164:104468.

© Л. П. Трубицына, А. В. Черданцев, 2026

УДК 532.59
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-136-141

С. А. Здорников[1], А. В. Черданцев[1]✉

Идентификация пространственно-временных траекторий волн возмущения в ЛИФ-данных на основе преобразования Радона

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

Аннотация. Представлено описание метода прямого измерения характеристик уединенных крупномасштабных возмущений поверхности обдуваемых газом пленок жидкости в пространственно-временных записях толщины пленки, полученных методом лазерно-индуцированной флюоресценции. Идентификация проводится при помощи автматического алгоритма на основе преобразования Радона. Рассмотрены сложные случаи движения с переменной скоростью, генерации и исчезновения волн, а также восстановление формы фронтов волн в трехмерном пространстве.

Ключевые слова: дисперсно-кольцевое течение, метод лазерно-индуцированной флюоресценции, распознавание образов

S. A. Zdornikov[1], A. V. Cherdantsev[1]✉

Identification of spatiotemporal trajectories of disturbance waves in LIF-data based on Radon transform

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

Abstract. Here we describe a method of direct measurement of parameters of solitary large-scale interfacial perturbations of gas-sheared liquid films in spatiotemporal records of film thickness obtained by laser-induced fluorescence technique. Identification is carried out using an automatic algorithm based on Radon transform. We consider complex cases of movement with variable speed, generation and disappearance of waves, and reconstruction of wave front shape in three-dimensional space.

Keywords: annular-dispersed flow, laser-induced fluorescence technique, pattern recognition

Введение

Дисперсно-кольцевой режим газожидкостного течения реализуется при высоких содержаниях газовой фазы. В этом режиме жидкость движется в виде пленки по стенкам канала, а газ движется с высокой скоростью в центральной части канала. При высоких расходах обеих фаз происходит срыв капель жидкости с поверхности пленки и унос их в ядро газового потока. Такое течение характеризуется высокой интенсивностью тепломассообмена и широко используется в различных отраслях промышленности.

Ключевую роль в дисперсно-кольцевом течении играют т.н. волны возмущения. Это крупные объемы жидкости, движущиеся по поверхности пленки с

высокой скоростью. Волны возмущения переносят основной объем жидкости, интенсифицируют перемешивание, теплообмен и гидравлическое сопротивление в потоке, а также необходимы для срыва капель [1-2].

Экспериментальное исследование волн возмущения проводится на основе записей толщины пленки. Как правило, это временные записи, полученные в одной точке пространства при помощи датчиков электропроводности.

Методы и материалы

Измерение параметров волн возмущения может вестить прямым и непрямым способом. Непрямой способ подразумевает наличие связи между параметрами волн возмущения и характеристиками всей записи (например, статистическими или спектральными). Прямой подход подразумевает поиск каждой отдельной волны возмущения, измерение ее свойств и последующий анализ распределения характеристики по всем волнам.

Прямой подход информативнее и достовернее, однако сложнее в реализации. Автоматическая идентификация волн по временным записям обычно проводится на основе порога амплитуды и осложняется вариацией амплитуды между индивидуальными волнами, вариацией амплитуды отдельной волны во времени, наличием волн других типов с близкими амплитудами, а также сложной, зачастую многогорбой формой волн возмущения.

В работах авторов для исследования дисперсно-кольцевых потоков применяется метод лазерно-индуцированной флюоресценции [3], позволяющий получать мгновенные профили поверхности пленки во всей области измерений (используя каждый пиксель камеры как датчик, измеряющий локальную мгновенную толщину пленки). Такой подход позволяет получать пространственно-временные записи толщины пленки, в которых можно отслеживать эволюцию каждого отдельного возмущения. Для работы с большими массивами данных требуется разработка автоматических алгоритмов идентификации характеристических линий волн возмущения.

Результаты

Фрагмент матрицы $h(x,t)$ приведен на рис. 1а. Яркость каждого пикселя изображения прямо пропорциональна измеренной толщине пленки в соответствующей ячейке матрицы. Суть метода заключается в измерении среднего значения толщины пленки вдоль прямой линии на пространственно-временной матрице толщин пленки, $h(x,t)$. В этом случае для идентификации волн используется комбинированный критерий, неявно включающий в себя скорость волны, а также стабильность волны (постоянство скорости и существование во всей пространственной области измерений). Матрица $h(x,t)$ преобразуется в матрицу:

$$R\left(V,t_0\right)=\frac{1}{X}\sum_{x=0}^{X}h\left(x,t_0+\frac{x}{V}\right),$$

где V – возможная скорость волны, определяемая как тангенс угла наклона линии к оси времени; t_0 – время появления линии в точке $x = 0$; X – полная длина области измерений.

Соответствующая матрица R представлена на рис. 1б. Волны возмущения в этой матрице выглядят как «холмы» с множеством «отрогов». Координаты вершины холма в матрице R позволяют провести линию, идентифицирующую волну возмущения. Для области, выделенной синим на рис. 1б, координаты максимума дают оранжевую линию на рис. 1в.

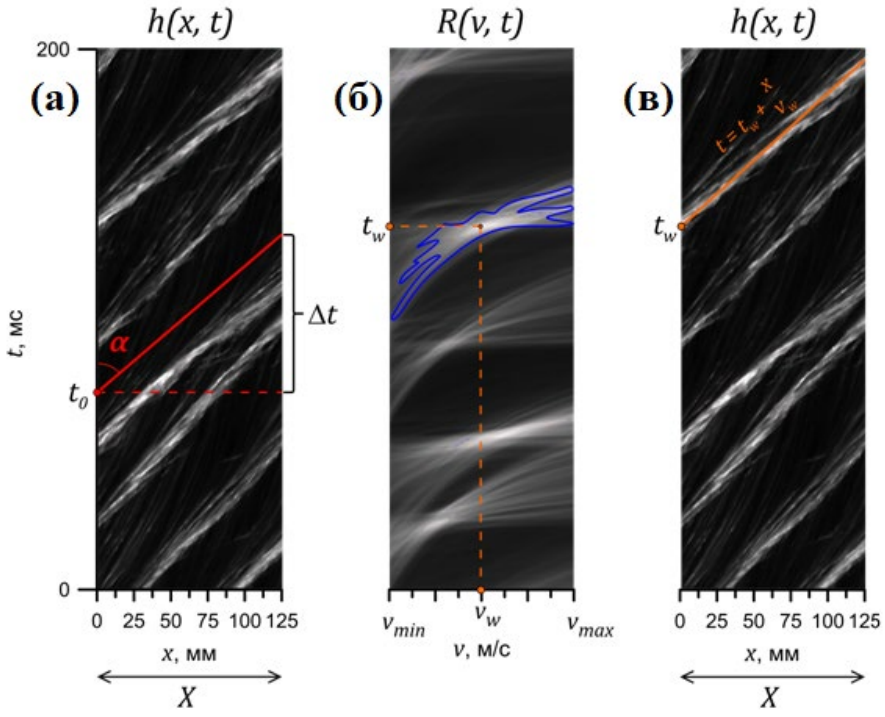


Рис. 1. Иллюстрация работы алгоритма, основанного на преобразовании Радона.

(а) Исходная пространственно-временная матрица толщин с определением параметров линии. (б) Преобразованная матрица в координатах $\{t_0, V\}$. (в) Линия, соответствующая максимуму в области, выделенной синим на рис. (б).

Для того, чтобы изолировать друг от друга «холмы», соответствующие отдельным волнам, требуется выбрать амплитудный порог. При работе с временными записями толщины пленки в литературе было перепробовано множество «универсальных» пороговых значений, определяемых различными линейными комбинациями средней, наиболее вероятной, минимальной толщины пленки, ее дисперсии и т.д. При этом отсуствовала возможность объективной оценки адекватности выбранного критерия. При работе с пространственно-временными записями визуальная проверка позволяет легко подтвердить, правильно ли определена волна возмущения, и отсеять ложно-положительные и ложно-отрицательные ошибки идентификации. Перебор вариантов комбинаций, определяющих пороговое значение (как предложенных ранее другими авторами, так и новых вариантов), не дал универсального работающего решения. Поэтому был выбран

другой путь: проводился перебор всех возможных значений порога, и определялось количество идентифицируемых волн при каждом значении. На основе данной зависимости в качестве порога автоматически выбиралось значение, соответствующее середине плато с максимальным числом идентифицируемых волн. Такой выбор позволяет минимизировать число ложно-отрицательных ошибок (анализ данных показал, что ложно-положительные ошибки случаются крайне редко). Проверка достоверности работы алгоритма проводится визуально, по изображениям с наложением найденных линий на матрицы толщины пленки.

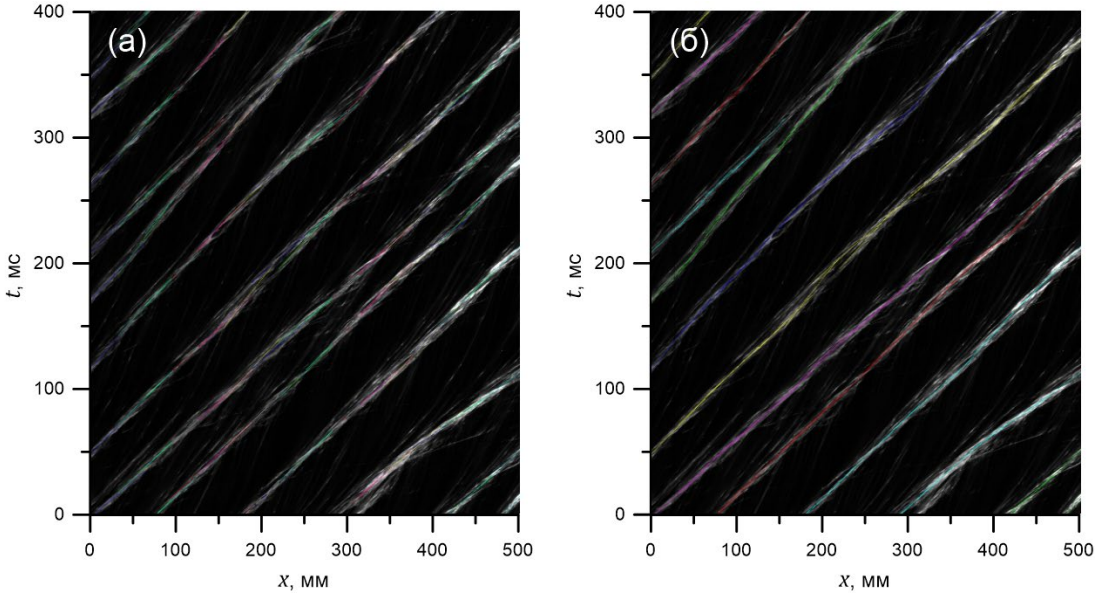


Рис. 2. Применение метода в условиях ускорения и замедления, а также появления и исчезновения волн.
(а) Идентификация прямых отрезков траекторий на коротких участках.
(б) Объединение отрезков в криволинейные траектории произвольной длины.
Водовоздушное дисперсно-кольцевое течение в нижней части горизонтальной трубы

Описанный алгоритм работает в случае прямых пространственно-временных траекторий волн (при движении с постоянной скоростью), существующих во всей области измерений. Такое приближение правомерно в области установившегося течения, т.е., на больших расстояниях от входа в канал. На начальном участке течения имеют место такие события, как: появление волн возмущения при слиянии начальных волн, ускорение волн возмущения, а также попарные слияния волн возмущения с поглощением одной из них. В верхней части горизонтальных труб возможно кажущееся появление, замедление и исчезновение волн (при росте азимутального размера волны возмущения и появлении ее нестабильных боковых краев в рабочей области) [4].

Для сложных случаев был разработан подход с делением рабочей области на узкие участки, на которых скорость волны можно считать примерно постоянной. Для каждого из участков проводится применение алгоритма (см. рис. 2а, где линии, найденные на различных участках, помечены разным цветом). После этого проис-

ходит сшивка линий на соседних участках по критерию близости их положения. Для повышения надежности алгоритма разбиение на участки производится с перекрытием 50%. Это также позволяет повысить гибкость алгоритма: при наличии перекрытия в процессе сшивки допустимо отсутствие линии на одном из участков. Таким образом, немногочисленные ложно-отрицательные ошибки с меньшей вероятностью приведут к разрыву траектории волны возмущения. На рис. 2б представлен тот же фрагмент матрицы после процедуры сшивки. Здесь цвет линии одинаков во всей рабочей области, при этом разным цветом помечены линии для разных волн.

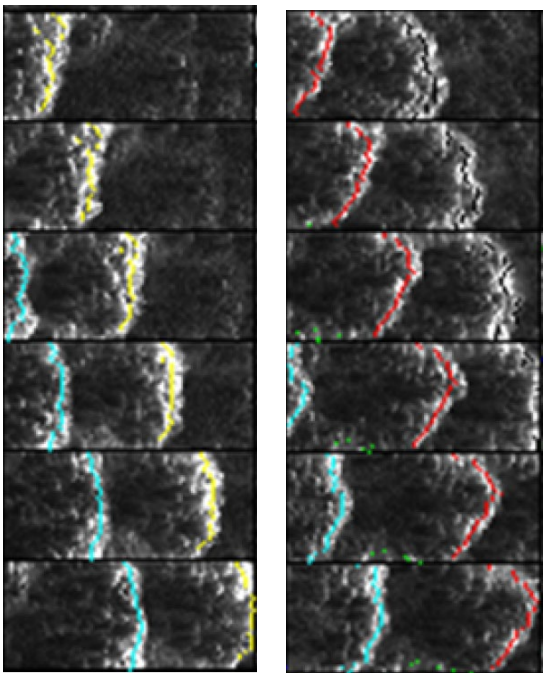


Рис. 3. Применение метода к идентификации трехмерных волн. Приведены примеры эволюции фронтов волн на поверхности обдуваемой газом пленки жидкости в горизонтальном прямоугольном канале. Продольный размер области 38 см, поперечный 16,6 см, шаг по времени 50 мс

До сих пор речь шла о пространственно-временных записях, полученных вдоль одной (продольной) координаты. При этом ЛИФ-метод позволяет получать такие данные в двумерной области (т.е. на прямоугольном участке стенки канала). В этом случае пространственно-временная матрица толщин становится трехмерной: $h(x,y,t)$. В трубах малого диаметра волны возмущения, как правило, замыкаются в кольцо и, несмотря на некоторую азимутальную вариацию по амплитуде, могут считаться двумерными. В экспериментах в горизонтальном прямоугольном канале [5] было показано, что в общем случае волны возмущения имеют конечный поперечный размер, различный для отдельных волн при одинаковых условиях, а форма фронтов может быть скошена и искривлена. Для исследования таких волн возможно применение того же алгоритма. Алгоритм применяется к каждой из матриц $h(x,t)$, составляющих матрицу $h(x,y,t)$, после чего производится сшивка характеристических линий, найденных для соседних значений

y. Пример реализации такой модификации алгоритма приведен на рис. 3. Видно, что алгоритм хорошо идентифицирует фронты волн и их сложную форму в плоскости $x - y$. Хотя поиск траекторий в матрицах $x - t$ велся в приближении постоянной скорости, алгоритм позволяет отслеживать деформации фронта во времени.

Заключение

В работе продемонстрированы возможности применения преобразования Радона к анализу пространственно-временной эволюции различных систем на примере поведения волн возмущения в дисперсно-кольцевых потоках, исследуемого методом лазерно-индуцированной флюоресценции. Показаны преимущества метода для прямого измерения параметров волн возмущения, описан принцип работы метода, предложены рекомендации по выбору параметров, а также способы расширения области применимости метода к сложным условиям.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН №126021217059-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hewitt, G.F., Hall Taylor, N.S., 1970. Annular Two-phase Flow. Pergamon, Oxford.

2. Azzopardi, B.J., 1997. Drops in annular two-phase flow. Int. J. Multiph. Flow 23, 1–53.

3. Cherdantsev, A., Bobylev, A., Guzanov, V., Kvon, A., & Kharlamov, S. (2023). Measuring liquid film thickness based on the brightness level of the fluorescence: Methodical overview. Int. J. Multiph. Flow, 168, 104570.

4. Zdornikov, S. A., Isaenkov, S. V., & Cherdantsev, A. V. (2024). Axial and azimuthal development of disturbance waves in annular flow in a horizontal pipe. Int. J. Multiph. Flow, 172, 104704.

5. Cherdantsev, A. V. (2023). Three-dimensional evolution and interaction of disturbance waves on a gas-sheared liquid film on a horizontal plane near the transition region. Int. J. Multiph. Flow, 164, 104468.

© С. А. Здорников, А. В. Черданцев, 2026

УДК 532.59
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-142-148

С. А. Здорников[1]✉, Л. П. Трубицына[1], С. В. Исаенков[1], А. В. Черданцев[1]

Влияние входной конфигурации на подъем жидкости двухфазного течения в горизонтальной трубе

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

Аннотация. В данной работе был исследован подъем жидкой пленки горизонтального газожидкостного течения в области стратифицированный-кольцевой режимы в зависимости от конфигурации входа. Сравнивались две конфигурации: стратифицированная (с разделительной пластиной) и кольцевая (с зазором для жидкости по периферии). Методом количественной визуализации были получены изображения течения сбоку, вычислена высота подъема жидкости и ее вариация. Показано, что кольцевой вход приводит к более быстрому нарастанию неустойчивости и генерации крупных волн. Замечено, что в режимах низкого расхода жидкости и высокой скорости газа при стратифицированном входе пленка поднимается раньше. Определено значение волновых процессов в растекании пленки по стенкам канала вместе с вторичными течениями в газе.

Ключевые слова: горизонтальное газожидкостное течение, кольцевой режим, входная конфигурация

S. A. Zdornikov[1]✉, L. P. Trubitsyna[1], S. V. Isaenkov[1], A. V. Cherdantsev[1]

The effect of the inlet configuration on the rise of a liquid in a horizontal two-phase flow

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

Abstract. In this paper, the rise of a liquid film in horizontal gas-liquid flow in the stratified-to-annular transition was investigated as a function of the inlet configuration. Two configurations were compared: stratified (with a separating plate) and annular (with a peripheral gap for liquid). Side-view flow images were obtained using quantitative visualization technique, and the liquid film height and its variation were calculated. The annular inlet was found to lead to faster instability growth and generation of large waves. At low liquid flow rates and high gas velocities, the film rises earlier for the stratified inlet. The role of wave processes in the spreading of the film along the channel walls, together with secondary flows in the gas phase, was identified.

Keywords: horizontal gas-liquid flow, annular regime, inlet configuration

Введение

В газожидкостных горизонтальных течениях, характерных для энергетики, нефтегазовой отрасли и систем охлаждения, одной из проблем является эффективность тепло- и массообмена между фазами и стенками канала, связанная с энергетическими потерями. В условиях малых расходов жидкости реализуются два режима. В стратифицированном течении жидкость течет в нижней части

канала, а газ – в верхней, взаимодействие фаз осуществляется на ограниченной области их контакта и отличается низкой интенсивностью. В кольцевом течении жидкость образует тонкую пленку на стенках трубы, а турбулентное газовое ядро занимает ее центральную часть, что обеспечивает интенсивный тепло- и массообмен.

В одной из наших работ [1] были выделены два переходных режима, отличающиеся друг от друга преобладающим механизмом установления кольцевого режима. В полукольцевом течении (большие расходы газа и малые расходы жидкости) пленка размазывается вторичными течениями в газе [2] по стенкам канала, поднимаясь на определенный уровень и не достигая верхней части трубы, причем прохождение крупных волн не оказывает влияния на высоту подъема. В волновом течении (малые расходы газа и большие расходы жидкости) жидкость забрасывается на стенки канала волнами возмущения [3], происходят колебания границы смачивания, пленка может достигать верхней части канала, но из-за гравитации не способна удержаться в этом положении.

Существует несколько способов подачи жидкости и газа в рабочий участок: в начале экспериментальной секции устанавливается определенная форма входа, которая, как следует ожидать, влияет на дальнейшее развитие газожидкостного потока – на волны, распространяющиеся по жидкой подложке, отрыв капель с их фронтов, вихревые структуры в газе и переход от стратифицированного к дисперсно-кольцевому течению. Немногочисленные исследования, посвященные условиям на входе [4-5], показывают, что конфигурация смесителя сдвигает границы режимов и влияет на длину начального участка, что может объяснять расхождения между картами течений разных авторов. Сильное перемешивание фаз на входе способно сразу задать конечную структуру потока и сдвинуть режимы на картах, тогда как раздельный ввод фаз без их взаимодействия не ускоряет переходы.

В данной работе для проверки гипотезы о вынужденной подаче фаз в неразвитом и развитом видах исследуются две конфигурации без смешения. Целью этого исследования является сравнение подъема жидкости в случае стратифицированного входа с разделительной пластиной и кольцевого входа с зазором для жидкости.

Методы и материалы

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Исследования проводятся в горизонтальной оргстеклянной круглой трубе длиной 2 м (внутренний диаметр составляет 20 мм, внешний – 30 мм). В газожидкостном распределителе (9) формируется сонаправленный поток жидкости и газа. Газ поступает через централизованную линию (2), жидкость подается с помощью насоса (6) из резервуара (5). Проходя через газожидкостный распределитель, фазы попадают в рабочий участок, где начинается их перемешивание – течение перестраивается и эволюционирует вниз по потоку. Затем течение оказывается в газожидкостном разделителе (10): газ уходит в атмосферу, а жидкость возвращается в резервуар.

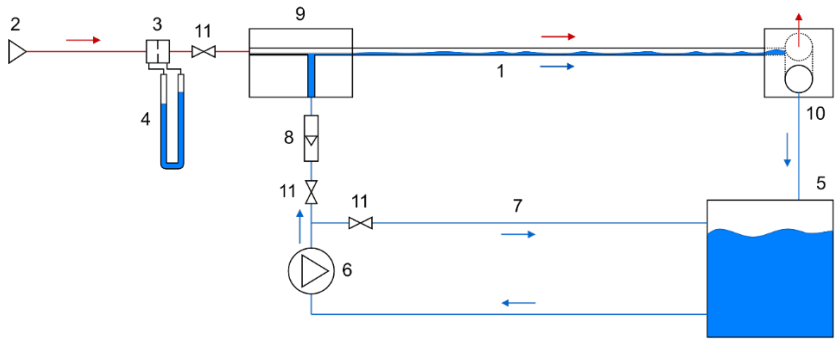


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: рабочий участок – (1), централизованная линия сжатого воздуха – (2), расходомер – (3), U-образный манометр – (4), резервуар – (5), насос – (6), обводная линия – (7), поплавковый ротаметр – (8), распределитель – (9), разделитель – (10), вентили – (11)

По горизонтальной части Т-образного газожидкостного распределителя (9) вводится газ, а по его вертикальной части – жидкость. Подача жидкости и газа представлена на рис. 2. Стратификация на входе обеспечивается горизонтальной металлической пластиной толщиной 1 мм, разделяющей жидкую и газовую фазы. Для создания кольцевой конфигурации в трубу коаксиально с ней помещается цилиндр, образующий зазор для жидкости толщиной 0,5 мм, внутри цилиндра распространяется газ.

В качестве входных параметров задавались расход жидкости и скорость газа. Для того, чтобы изучать область перехода от стратифицированного к кольцевому течению, расход жидкости варьировался от 3,8 мл/с до 25,1 мл/с, среднерасходная скорость газа изменялась в диапазоне от 5 м/с до 40 м/с с шагом 5 м/с.



Рис. 2. Конфигурация входа: слева – стратифицированный, справа – кольцевой

Газожидкостное течение визуализируется с видом сбоку. Горизонтальная оргстеклянная труба с водовоздушным потоком с одной стороны записывается высокоскоростной камерой, с другой стороны освещается лампой белого света мощностью 1 кВт, установленными на том же самом уровне, что и труба. Расстояние между камерой и трубой равно 2 м, а длина видимой камерой части рабочего участка составляет 600 мм. Пространственное разрешение камеры 0,6 мм/пикс. Записываются два участка общей протяженностью 1,1-1,2 м.

Для количественного определения границы смачивания стенок канала между лампой и трубой размещается лист с фоновыми линиями (толщина 1 мм, шаг 8 мм), изображения которых перекрываются жидкостью при ее подъеме. Для вычисления локальной и мгновенной высоты подъема необходимо решить оптическую задачу, учтя преломление на криволинейной поверхности круглой трубы. Пересчет видимой высоты в реальную производится по следующим формулам:

$$n_\beta \cdot \sin\beta = n_\alpha \cdot \sin\alpha,$$
$$z_B - z_A = (y_B - y_A) \cdot \mathrm{tg}(\alpha - \beta),$$

где n_α и n_β – показатели преломления среды снаружи и материала трубы; α и β – углы падения и преломления на внешней части соответственно, а координаты $(y_A; z_A)$ и $(y_B; z_B)$ отвечают точкам, лежащим на внешней и внутренней поверхностях канала. Их можно посчитать, замкнув систему уравнениями окружностей. Более подробно процесс обработки изображений описан в работе [1]. На изображениях течения в верхней части трубы из-за полного внутреннего отражения на границе стекло-внешняя среда образуется слепая область, мешающая установить, произошло ли окончательное замыкание жидкой пленки. В экспериментах с кольцевым входом труба была заключена в прямоугольный короб, заполненный водой. Это позволило уменьшить размер слепой области.

Результаты

Данные, полученные в результате эксперимента, представляют собой изображения течения сбоку. По этим изображениям можно наблюдать за эволюцией течения, определить режимы потока и, обработав их, вычислить высоту подъема жидкости. На рис. 3 представлена с видом сбоку динамика подъема жидкости для всех наблюдаемых режимов течения.

На рис. 4 показана зависимость усредненной высоты подъема жидкости и ее вариации в виде планок погрешностей от расстояния до входа для некоторых характерных режимов. В стратифицированном режиме распространение жидкости не зависит от входной конфигурации: в случае кольцевого входа вся жидкость стекает в самом начале рабочей области. В области переходных режимов пленка, проходя через кольцевой зазор, постепенно опускается до определенного уровня на некотором расстоянии вниз по потоку – для полукольцевого режима (режимы $Q_L = 3{,}8$ мл/с, $V_G = 35$ м/с и $Q_L = 5{,}7$ мл/с, $V_G = 30$ м/с) стабилизируется на нем, а для волнового режима (режимы $Q_L = 8{,}8$ мл/с, $V_G = 20$ м/с и $Q_L = 13{,}8$ мл/с, $V_G = 15$ м/с) колеблется относительно этого уровня – так же, как и в случае со стратификацией фаз, причем установление переходных течений происходит примерно на одном и том же расстоянии 400-450 мм.

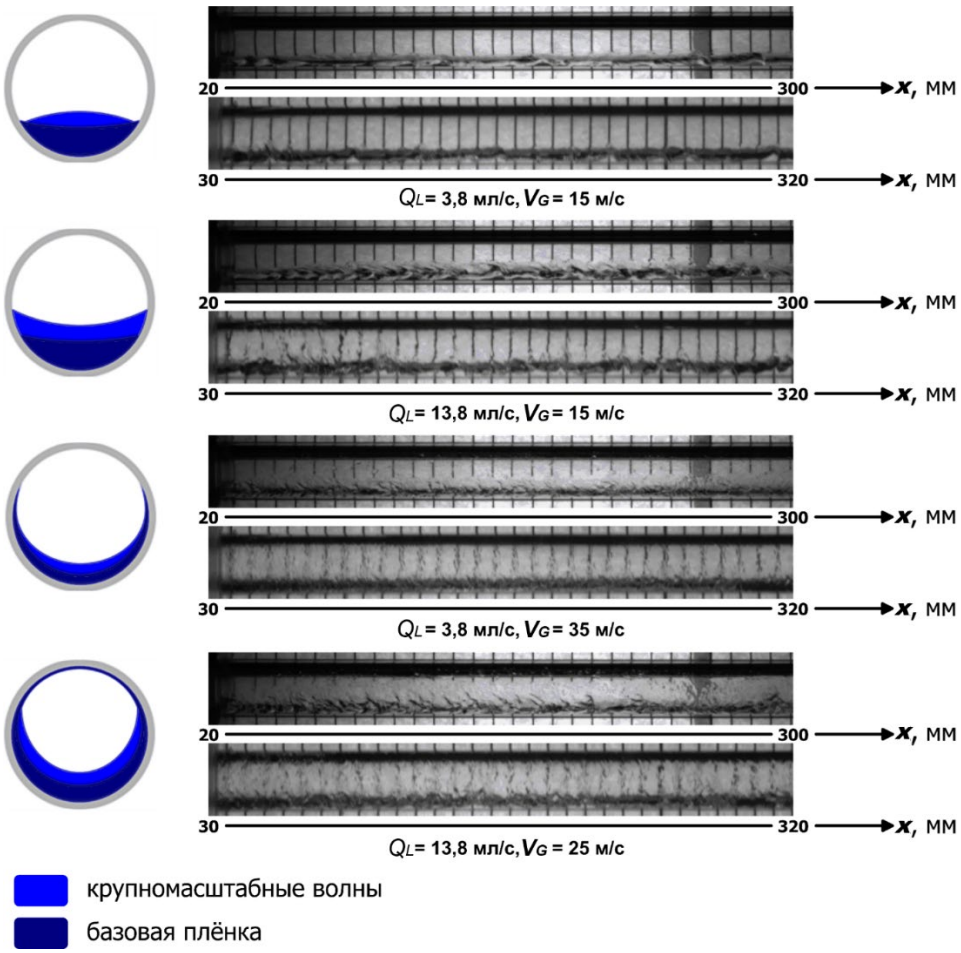


Рис. 3. Экспериментальные изображения течения сбоку для каждого режима в первой половине первого рабочего участка.
Режимы сверху вниз: стратифицированный, переходные волновой и полукольцевой, кольцевой. Верхние изображения соответствуют стратифицированному входу, нижние – кольцевому

При высоких расходах фаз при вводе жидкости в нижнюю часть канала она постепенно поднимается и приобретает кольцевую форму, а при подаче жидкости по всей периферии трубы может сразу сформироваться кольцевое течение. Вопрос полной стабилизации потока, то есть достижения стационарных значений всех его параметров (профиля толщины и волновой структуры пленки), остается открытым.

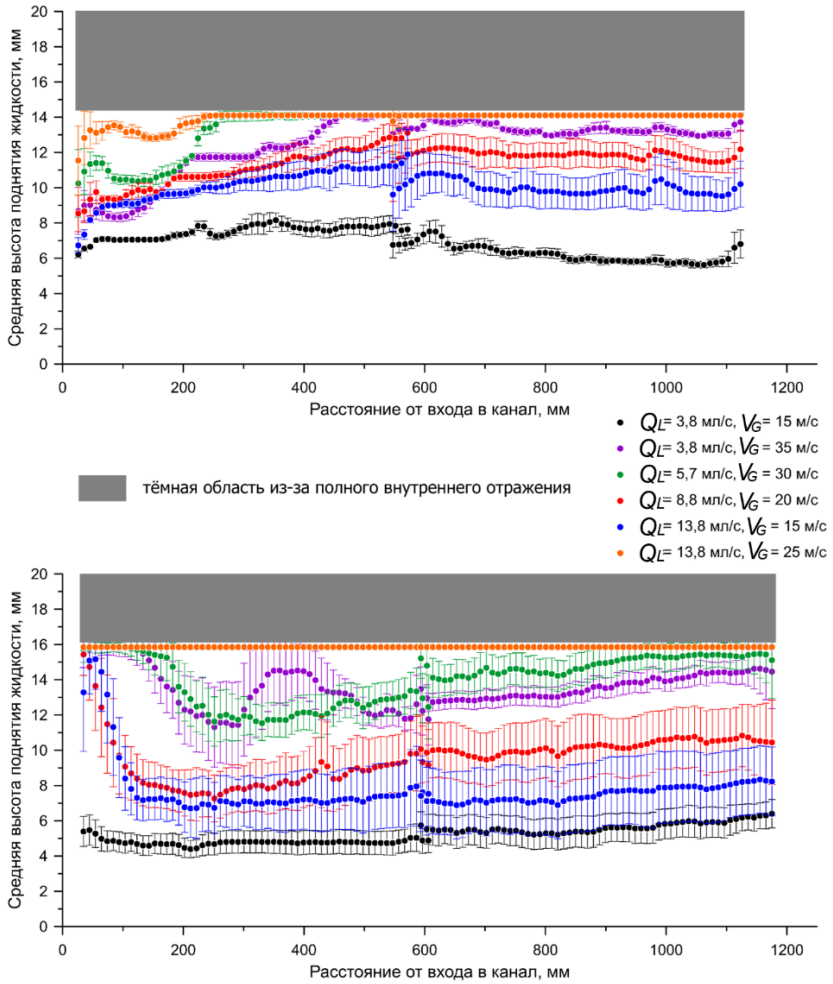


Рис. 4. Высота подъема жидкости с расстоянием вниз по потоку.
Сверху – стратифицированный вход, снизу – кольцевой вход

Вариация высоты подъема соответствует колебаниям пленки и указывает на прохождение крупных волн и случайные забросы жидкости на стенки канала такими волнами. Следует отметить, что в случае кольцевого входа эта характеристика принимает большие значения на протяжении всего исследуемого участка в отличие от стратифицированного входа, при котором вариация нарастает постепенно. Это может свидетельствовать о том, что при вводе через кольцевой зазор течение становится более неустойчивым, а это, в свою очередь, способствует более эффективной генерации крупных волн. Для проверки этого предположения необходимо изучить волновую составляющую жидкой пленки.

Обнаружено, что в условиях низкого расхода жидкости и высокой скорости газа (режим $Q_L = 5{,}7$ мл/с, $V_G = 30$ м/с) в трубе со стратифицированным входом пленка раньше взбирается в верхнюю часть канала, чем в трубе с кольцевым входом. На самом деле, по полученным изображениям (и в том числе по графикам высоты) в последнем случае пленке не удается снова замкнуться, и можно отнести это течение к полукольцевому режиму: данной длины наблюдаемого участка недостаточно, чтобы делать выводы о том, установится ли кольцевой режим при

подаче жидкости через кольцевой зазор. Вероятно, это происходит из-за формирования более крупных волн: пленка в верхней части истощается, стекая и передавая жидкость волнам возмущения, что приводит к их росту ввиду сильной неустойчивости. Это также косвенно подтверждает средняя высота подъема, которая в случае кольцевой конфигурации принимает меньшие значения (режим $Q_L = 13{,}8$ мл/с, $V_G = 15$ м/с). Как уже было сказано выше, чтобы в этом удостовериться, нужно исследовать непосредственно крупномасштабные волны, а не подъем жидкости по стенкам трубы.

Заключение

В ходе экспериментов с помощью метода количественной визуализации исследован подъем жидкости в водовоздушном течении, и проанализировано изменение высоты подъема вниз по потоку в зависимости от конфигурации входа.

Установлено, что конфигурация входа определяет характер развития неустойчивости вдоль канала. В случае кольцевого зазора возмущения нарастают быстрее, а крупные волны генерируются уже на начальном участке.

Показано, что при низких расходах жидкости и высоких скоростях газа более поздний подъем пленки в верхнюю часть канала при кольцевом входе связан с перестройкой течения, при которой жидкая пленка снабжает крупные волны, пробегающие в нижней части и на стенках канала. Это указывает на то, что волновые процессы играют роль в перераспределении жидкости по периферии канала наравне с вторичными течениями в газовой фазе.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на прямой анализ волновой структуры пленки.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН №126021217059-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cherdantsev A.V. et al. Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe // Exp. Therm. Fluid Sci. 2022. Vol. 132, №110552. P. 1–17.

2. Vollestad P., Angheluta L., Jensen A. Experimental study of secondary flows above rough and flat interfaces in horizontal gas-liquid pipe flow // Int. J. Multiph. Flow. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 125. P. 103235.

3. Jayanti S., Hewitt G., White S. Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow // Int. J. Multiph. Flow. 1990. Vol. 16, № 6. P. 1097–1116.

4. dos Santos C.N.M. et al. Patterns of horizontal gas-liquid pipe flows: effect of inlet/outlet configuration // J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2023. Vol. 45, №542. P. 1–18.

5. Milan M. et al. Adiabatic vertical downward air-water flow pattern map: Influence of inlet device, flow development length and hysteresis effects // Int. J. Multiph. Flow. 2013. Vol. 56. P. 126–137.

© С. А. Здорников, Л. П. Трубицына, С. В. Исаенков, А. В. Черданцев, 2026

УДК 532.54
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-149-154

Д. Е. Легостаев[1], Н. А. Гуляев[1], И. А. Евдокименко[1]✉, П. Д. Лобанов[1]

Движение газовых пузырей через пучок горизонтальных труб при нисходящем течении жидкости

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамической структуры нисходящего двухфазного потока в модели парогенератора при варьировании скоростей жидкости и газа. Расходная скорость жидкости в эксперименте составляла от 0,45 до 1,1 м/с, расход газа варьировался от 0,5 до 2 л/мин. При помощи метода лазерной доплеровской анемометрии были получены профили скорости для однофазного потока и двухфазного потока при расходном газосодержании, равном 1 %. Было произведено измерение перепада давления между верхней и нижней частями рабочего участка. Показано, что на низких скоростях потока наблюдается зависание пузырей. С ростом расхода газа наблюдается увеличение количества пузырей.

Ключевые слова: двухфазный поток, скорость потока, расход газа, нисходящее течение

D. E. Legostaev[1], N. A. Gulyaev[1], I. A. Evdokimenko[1]✉, P. D. Lobanov[1]

Movement of gas bubbles through a bundle of horizontal tubes during downward liquid flow

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

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the hydrodynamic structure of a downward two-phase flow in a steam generator model with varying liquid and gas velocities. The liquid flow rate in the experiment ranged from 0,45 to 1,1 m/s, while the gas flow rate varied from 0,5 to 2 l/min. Using laser Doppler anemometry, velocity profiles were obtained for single-phase and two-phase flows at a gas fraction of 1 %. The pressure difference between the upper and lower parts of the working section was measured. Bubbles were shown to hang at low flow rates. As the gas flow rate increases, the number of bubbles increases.

Keywords: two-phase flow, flow velocity, gas flow rate, downward flow

Введение

Промышленные установки с горизонтальными пучками труб нашли свое применение во многих отраслях производства: авиа- и машиностроении, химической технологии, а также в различных энергетических установках. К таким установкам относятся теплообменники, испарители, парогенераторы. Надежность устройства парогенераторов влияет на безопасность работы станций. Прогнозирование динамики двухфазного потока является важной задачей при их проектировании, поскольку гидродинамическая неустойчивость и вызванные ею вибрации могут приводить к аварийным ситуациям, таким как разрыв трубок с

последующим истечением в контур дисперсной фазы. Известно, что гидродинамическая структура газожидкостного течения зависит от геометрии канала, его ориентации в пространстве и направления в нем течения. Экспериментальная база о режимах таких течений в каналах сложной геометрии может позволить улучшить существующие математические модели для составления протоколов безопасности при проектировании энергетического оборудования.

Современные работы по двухфазным течениям в трубных пучках охватывают идентификацию режимов, гидродинамику и методы расчета. В [1] на основе визуализации и замеров перепада давления для вертикального поперечного обтекания выделены пузырьковый, промежуточный и дисперсионный режимы. С помощью PIV-измерений в [2] получены поля скоростей фаз при вертикальном барботаже, что важно для предотвращения осушения и вибраций в теплообменниках. Влияние размера пузырей на структуру потока и пристенное трение в нисходящем течении исследовано в [3]; показано, что эффект наиболее выражен при малых числах Рейнольдса. Для горизонтальных пучков с падающей пленкой в [4] методом *k*-средних объективно выделены четыре режима и проанализирована их связь с теплообменом. В [5] обнаружена зависимость масштабов вызванной пузырями конвекции от геометрии цилиндров. Карты режимов для узких вертикальных каналов при подъемном и опускном движении построены в [6]. Статистический метод распознавания режимов по плотности вероятности флуктуаций газосодержания предложен в [7]. В [8] разработаны критерии перехода для пяти режимов поперечного потока в горизонтальных пучках, позволяющие прогнозировать структуру течения при различных компоновках. В [9] установлено, что режим течения определяет преобладающий механизм потерь давления (трение, инерция, гравитация), и даны новые корреляции для точного расчета перепадов в каждом режиме.

Целью данной работы является экспериментальное исследование гидродинамической структуры нисходящего двухфазного потока при обтекании горизонтального пучка труб при варьировании скоростей жидкости и газа.

Методы и материалы

Экспериментальная установка (рис. 1) из оргстекла с внутренними размерами 277x92x21 мм состоит из 31 стеклянной трубки диаметром 18 мм, расположенных в три ряда на расстоянии 12 мм друг от друга. Рабочая жидкость (дистиллированная вода) прокачивалась через рабочий участок сверху вниз с помощью центробежного насоса со скоростью потока от 0,45 до 1,1 м/с. Рабочий газ подавался в систему через капилляр с внутренним диаметром 1 мм, вмонтированный в подводящую трубу опускной секции парогенератора. Расход газа в эксперименте составил от 0,5 до 2 л/мин. Визуализация течения двухфазного потока проводилась с помощью высокоскоростной камеры с частотой съемки 500 к/с и продолжительностью записи 2 секунды. Также в рамках эксперимента проводилось измерение локальных значений скорости потока в фиксированных сечениях при помощи лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) на трех

заданных высотах h_1 = 50 мм, h_2 = 125 мм и h_3 = 175 мм при объемном газосодержании равном 1 %.

Результаты

Были получены данные визуализации пузырькового течения при числах Рейнольдса 14800 и 20200 и скоростях газа 0,01 и 0,04 м/с. При обработке визуализации были получены профили плотностей вероятности движений пузырей и диаграммы распределений пузырей вдоль оси *Y*. Все эти данные представлены на рис. 2 – 4. На рис. 5 представлены профили скостей жидкости при Re = 22900 в однофазном потоке при β = 1%.

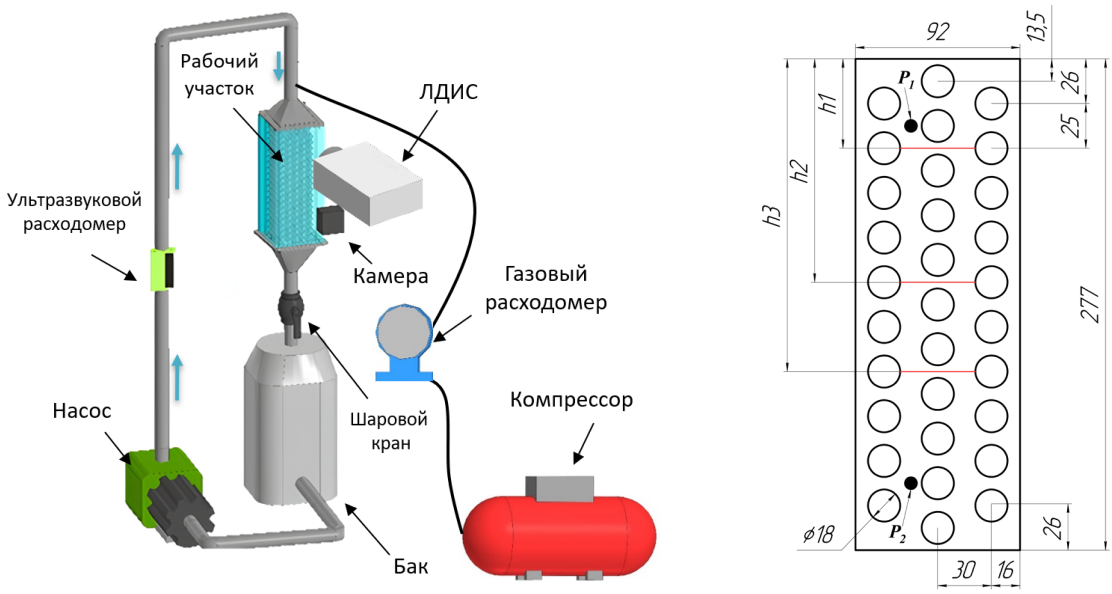


Рис. 1. Экспериментальная установка

Обсуждение

В ходе экспериментального исследования была проведена оценка влияния соотношения расходной скорости жидкости и газа на локальную гидродинамическую структуру нисходящего двухфазного потока в канале с горизонтальным пучком труб. При инжекции газа наблюдалась асимметрия распределения дисперсной фазы, выражающаяся в большей концентрации пузырей в одном из субканалов.

При Re = 14800 наблюдается зависание пузырей под трубками с последующим их накоплением в газовый снаряд. При Re = 20200 данного эффекта не наблюдается, т. е. при увеличении скорости жидкости все пузыри начинают двигаться вниз.

При помощи лазерной доплеровской анемометрии наблюдалось увеличение скорости потока при вводе в жидкость газа. При всех режимах за трубками скорость потока равна меньше нуля, что говорит о возникновении зон возвратных течений.

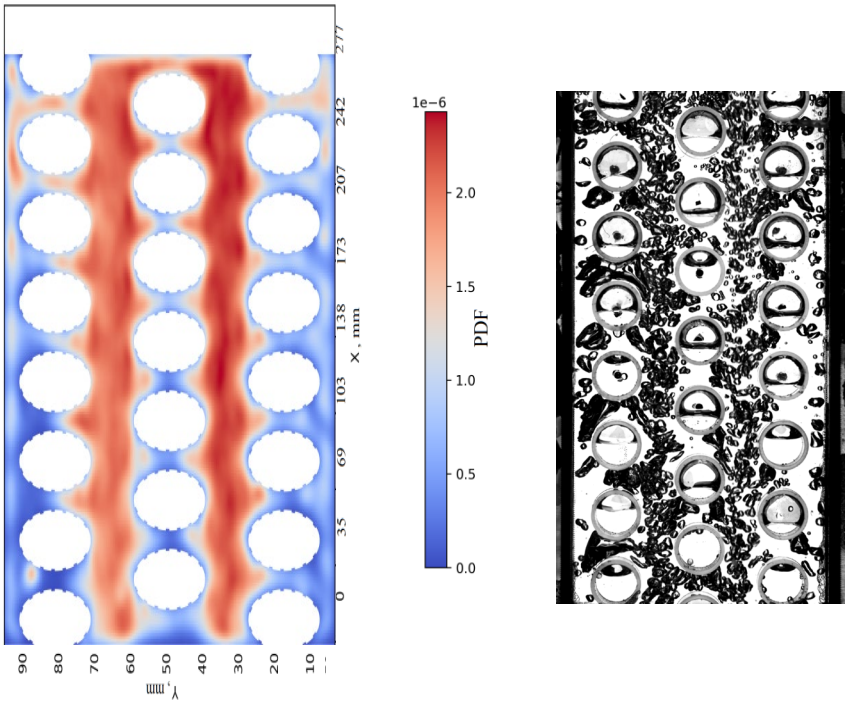


Рис. 2. Распределение пузырей в канале при Re = 14800 и $U_Г$ = 0,04 м/с

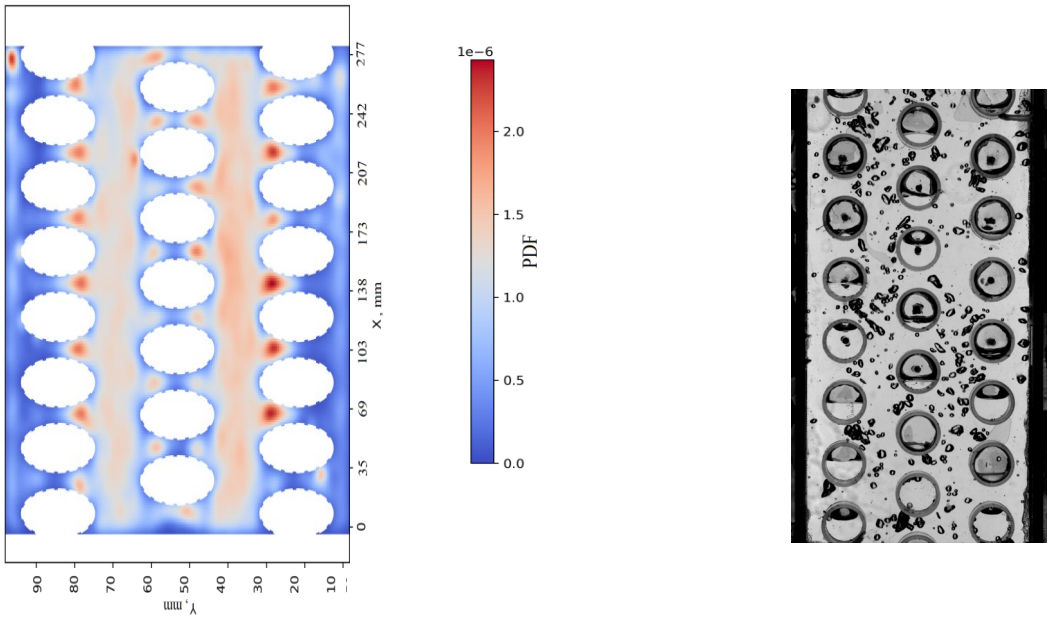


Рис. 3. Распределение пузырей в канале при Re = 20200 и $U_Г$ = 0,01 м/с

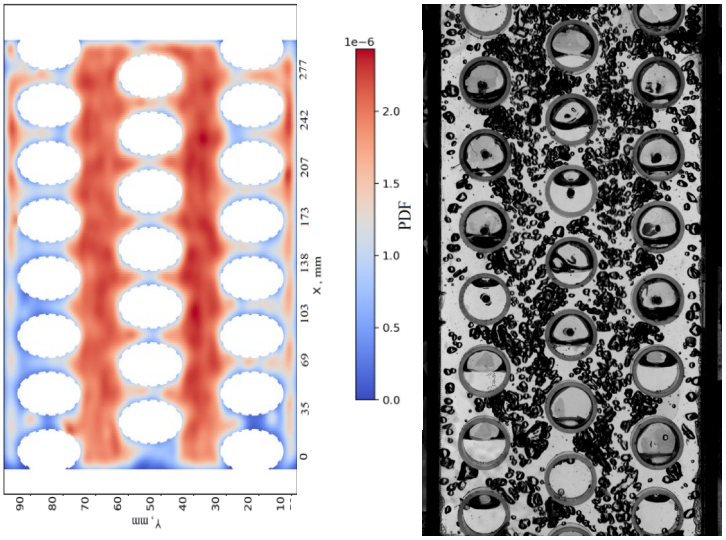
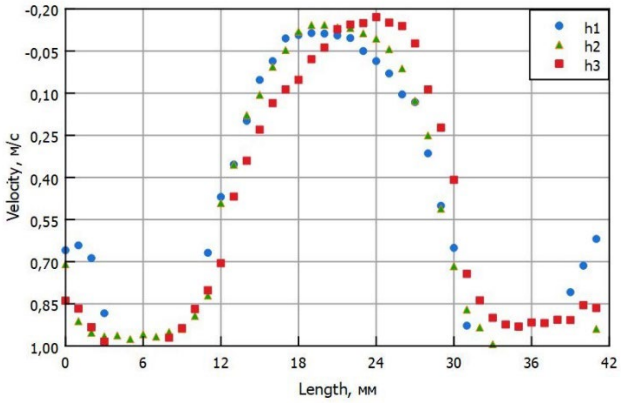


Рис. 4. Распределение пузырей в канале при Re = 20200 и $U_Г$ = 0,04 м/с



β = 0%

Рис. 5. Профили скоростей жидкости в однофазном потоке при Re = 22900

При измерении перепада давления в модели наблюдалось увеличение разницы давления с увеличением числа Рейнольдса и скорости газа.

Заключение

Была проведена оценка влияния соотношения расходной скорости жидкости и газа на локальную гидродинамическую структуру нисходящего двухфазного потока в канале с горизонтальным пучком труб.

1. Установлено, что при инжекции газа наблюдалась асимметрия распределения дисперсной фазы, выражающаяся в большей концентрации пузырей в одном из субканалов.

2. Показано, что при низких скоростях потока жидкости наблюдается зависание одиночных пузырей под трубками с последующим их накоплением и

формирование в газовый снаряд. При увеличении скорости жидкости данного эффекта не наблюдается.

3. При помощи лазерной доплеровской анемометрии было показано наличие зон возвратных течений за трубками, где вектор скорости направлен противоположно основному направлению течения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ulbrich R. and Mewes D. Vertical, upward gas-liquid two-phase flow across a tube bundle // Int. J. Multiphase Flow. – 1994. – Vol. 20, No. 2. – P. 249–272.

2. Iwaki C., Cheong K. H., Monji H., Matsui G. Vertical, Bubbly, Cross-Flow Characteristics over Tube Bundles // Experiments in Fluids. – 2005. – Vol. 39. – P. 1024–1039.

3. Evdokimenko I. A., Lobanov P. D., Pakhomov M. A., Terekhov V. I., Das P. K. The Effect of Gas Bubbles on the Flow Structure and Turbulence in a Downward Two-Phase Flow in a Vertical Pipe // Journal of Engineering Thermophysics. – 2020. – Vol. 29, No. 3. – P. 414–423.

4. Zhao C. Y., Yao Z. L., Qi D., Feng Y. Q., Jiang J. M. Intercolumn two-phase flow patterns across falling film tube bundles // Physics of Fluids. – 2023. – Vol. 35. – P. 075113-1 – 075113-13.

5. Yuichi M., Toshio S., Masa-aki I., Fujio Y. Bubble-Driven Convection Around Cylinders Confined in a Channel // Journal of Fluids Engineering. – 2005. – Vol. 127. – P. 117–123.

6. Chalgeri V. S., Jeong J.H. Flow patterns of vertically upward and downward air-water two-phase flow in a narrow rectangular channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 128. – P. 934–953.

7. Noghrehkar G.R., Kawaji M., Chan A.M.C. Investigation of two-phase flow regimes in tube bundles under cross-flow conditions // International Journal of Multiphase Flow. – 1999. – Vol. 25. – P. 857–874.

8. Mao K., Takashi H. Flow regime transition criteria for upward two-phase cross-flow in horizontal tube bundles // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 112. – P. 1533–1546.

9. Zhang K., Hou Y.D., Tian W.X., Zhang Y.P., Su G.H., Qiu S.Z. Flow pattern effect on two-phase pressure drops in vertical upward flow across a horizontal tube bundle // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 120. – P. 253–264.

© Д. Е. Легостаев, Н. А. Гуляев, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов, 2026

УДК 532.54
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-155-159

Т. А. Сапаев[1], И. А. Евдокименко[1]✉, П. Д. Лобанов[1]

Структура двухфазного пузырькового течения в кольцевом канале с вращающимся внутренним цилиндром

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

Аннотация. Исследовано влияние скорости вращения внутреннего цилиндра на структуру двухфазного потока вода-воздух в кольцевом канале. Эксперименты проводились при скорости вращения от 5 до 25 об/с и расходе газа от 300 до 600 мл/мин. При помощи метода цифровой трассерной визуализации были получены данные о возникновении кольцевых тороидальных структур в однофазном потоке. При введение газовых пузырьков поток наблюдается смещение пузырей к стенке цилиндра, где они увлекаются потоком жидкости. Увеличение скорости вращения цилиндра приводит к формированию нестационарных газовых спиральных жгутов, что объясняется развитием неустойчивости течения.

Ключевые слова: двухфазный поток, скорость потока, расход газа, нисходящее течение

T. A. Sapaev[1], I. A. Evdokimenko[1]✉, P. D. Lobanov[1]

Structure of two-phase bubble flow in an annular channel with a rotating inner cylinder

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

Abstract. The effect of the rotation speed of the inner cylinder on the structure of a two-phase water-air flow in an annular channel is investigated. The experiments were carried out at inner cylinder rotation rates ranging from 5 to 25 rps and gas flow rates from 300 to 600 mL/min. It was shown that, after gas injection, the bubbles migrate toward the vicinity of the rotating cylinder wall and are entrained by the azimuthal liquid flow. An increase in the cylinder rotation rate leads to a transformation of the flow structure accompanied by the formation of unsteady spiral gas filaments. It was established that the formation and increasing complexity of these spiral structures are associated with the development of hydrodynamic instabilities in the flow.

Keywords: two-phase flow, flow velocity, gas flow rate, downward flow

Введение

Современная авиационная промышленность предъявляет повышенные требования к энергоэффективности, надежности, ресурсу и снижению массогабаритных характеристик летательных аппаратов. В связи с этим возрастает интерес к исследованиям сложных гидродинамических процессов, возникающих в элементах авиационных двигателей и вспомогательных систем, поскольку характеристики течения существенно влияют на эффективность теплообмена, устойчивость работы узлов и уровень гидродинамических потерь. Одной из важных модельных конфигураций является течение в кольцевом канале с вращающимся внутренним цилиндром, которое

позволяет описывать процессы, протекающие в высокоскоростных подшипниках, лабиринтных уплотнениях, системах охлаждения турбомашин, роторно-статорных устройствах и других узлах авиационной техники, где реализуются течения во вращающихся узких зазорах.

Исследование течений в кольцевых каналах с вращающимися цилиндрами ведется на протяжении десятилетий. Одним из наиболее известных классов подобных течений являются течения Тейлора-Куэтта. Интерес к ним вызван многообразием возникающих гидродинамических режимов и неустойчивостей, таких как вихри Тейлора, волновые и спиральные структуры, влияющие на перенос импульса, тепла и массы. Несмотря на большое количество работ по однофазным течениям, газожидкостные потоки в кольцевых каналах исследованы недостаточно. Это связано со сложным взаимодействием фаз, миграцией пузырей под действием центробежных сил и изменением структуры течения при вращении внутреннего цилиндра. Известно, что присутствие газовой фазы способно существенно изменять характеристики течения, включая интенсивность турбулентности, структуру вихрей и процессы тепло- и массообмена. Так, в работе [1], выполненной для вязкого раствора глицерина, было показано, что при высоких скоростях вращения внутреннего цилиндра введение газовых пузырей приводит к формированию спиралевидного газового жгута, оказывающего заметное влияние на структуру потока и межфазный перенос. В статье исследовано влияния скорости вращения внутреннего цилиндра на структуру двухфазного потока «вода–воздух» в кольцевом канале с использованием метода теневой съемки, позволяющего визуализировать распределение газовой фазы и особенности гидродинамической структуры течения.

Методы и материалы

Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой прозрачный внешний цилиндр, изготовленный из оргстекла, с внутренним радиусом 52 мм и высотой 400 мм, установленный на пластиковом основании. Внутри него соосно размещался цилиндр из оргстекла с внешним радиусом 35 мм и высотой 500 мм. Ширина кольцевого зазора между цилиндрами составляла 17 мм. Вращение внутреннего цилиндра осуществлялось посредством его соединения с валом шагового двигателя, обеспечивающего частоту вращения до 1800 об/мин. Управление режимами работы двигателя выполнялось с использованием микроконтроллера и специализированного программного обеспечения. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Подача газа в кольцевой канал осуществлялась через восемь капилляров диаметром 0,5 мм, встроенных в основание установки. Расход газа контролировался при помощи газового расходомера и варьировался в диапазоне от 300 до 600 мл/мин. Система имела свободную поверхность жидкости, контактирующую с атмосферой, что обеспечивало удаление газовых пузырьков из объема установки.

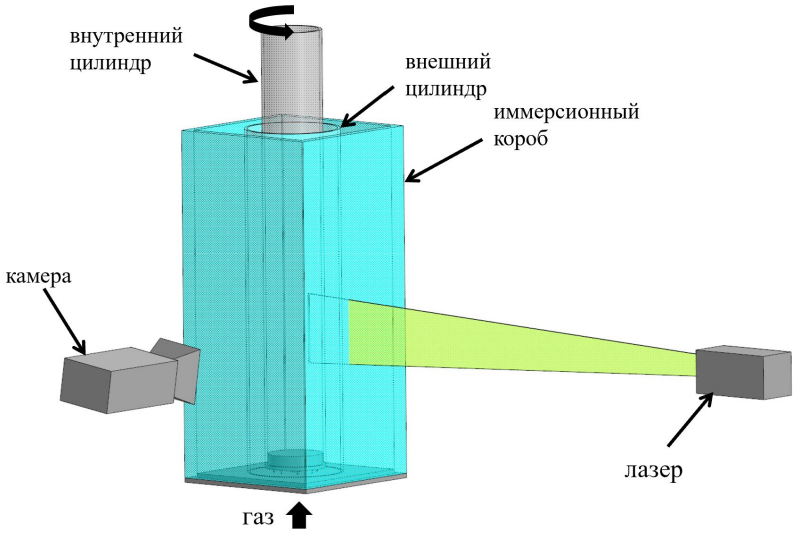


Рис. 1. Экспериментальная установка

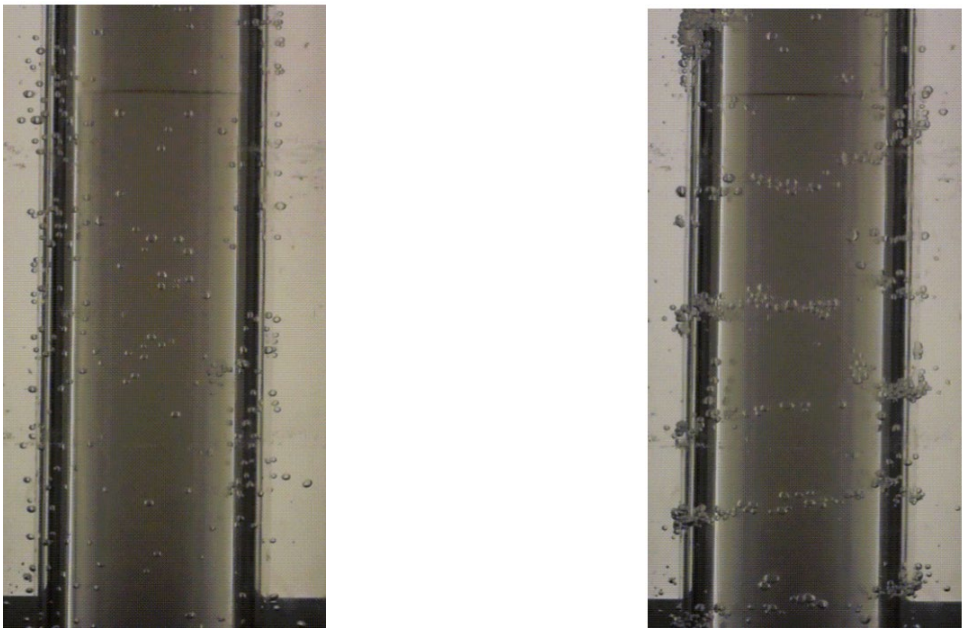
Для проведения оптических исследований вокруг рабочей секции был установлен дополнительный оргстеклянный короб, заполненный иммерсионной жидкостью, что позволяло минимизировать оптические искажения при визуализации потока методами теневой съемки. Для проведения визуализации потока методом теневой съемки внутрь внутреннего цилиндра был помещен лист светорассеивающего пластика. Съемки течения осуществлялась цифровой камерой со скоростью 120 кадров в секунду в течение 3 секунд. Анализ полученных теневых изображений проводился методом ручной попиксельной обработки кадров.

Результаты

Были получены данные визуализации пузырькового течения в диапазоне чисел Рейнольдса от 13000 до 80000 (рассчитанном по скорости вращения внутреннего цилиндра). Расход газа варьировался от 300 до 600 мл/мин. Фотографии визуализации представлены на рис. 2. Результаты обработки данных о расположении газовых витков приведены на рис. 3.

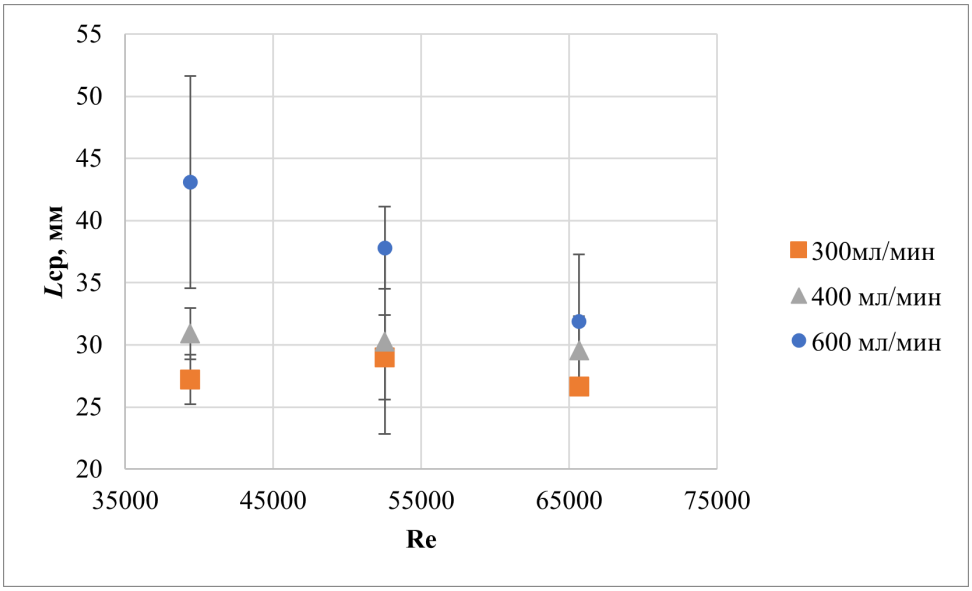
Обсуждение

При введении газовой фазы через восемь капилляров диаметром 0,5 мм в кольцевой канал системы Тейлора-Куэтта формировались пузырьки воздуха со средним диаметром около 1,2 мм. При минимальном расходе газа 300 мл/мин и малых скоростях вращения внутреннего цилиндра (5–10 об/с) наблюдалось образование отдельных пузырей, которые увлекались азимутальным течением жидкости и, преимущественно, перемещались вблизи поверхности внутреннего цилиндра под действием центробежных сил. Распределение пузырей по объему канала оставалось относительно однородным, а взаимодействие между пузырями было незначительным.



а) *б)*

Рис. 2. Визуализация двухфазного течения при расходе газа $Q_г$=300 мл/мин для а) Re= 26000 б) Re= 52000



β = 0%

Рис. 3. Влияние расхода газа на расстояние между газовыми жгутами

С увеличением скорости вращения цилиндра до 15–20 об/с течение становилось гидродинамически неустойчивым, что сопровождалось появлением характерных вихревых структур Тейлора. Газовые пузырьки начинали концентрироваться в областях циркуляционных течений, формируя вытянутые спиралевидные структуры, ориентированные вдоль оси канала. При этом наблюдалось увеличение степени закрутки газовых жгутов и уменьшение шага спирали по

мере роста скорости вращения внутреннего цилиндра.

Повышение расхода газа до 400–500 мл/мин приводило к увеличению объемного газосодержания в канале и усилению межпузырькового взаимодействия. В потоке начинали формироваться более крупные газовые кластеры. Спиральные структуры становились более выраженными и устойчивыми, а отдельные пузырьки начинали объединяться в непрерывные газовые нити. Одновременно наблюдалось увеличение амплитуды колебаний газовых жгутов и их периодическое перераспределение по радиусу канала.

Заключение

Была проведена оценка влияния скорости вращения внутреннего цилиндра и расхода газа на гидродинамическую структуру двухфазного потока в кольцевом канале:

– показано, что при введении газа с расходом 300 мл/мин в кольцевой канал при малых оборотах цилиндра (до Re=26000) происходит генерация малых по размеру пузырей, которые увлекаются потоком жидкости, возникающим при вращении;

– показано, что пузыри склонны двигаться вблизи стенки цилиндра, что объясняется влиянием центробежных сил. При скорости вращения цилиндра более 15 об/с (Re=39000) газовые пузыри собираются в спиральные жгуты, и с увеличением скорости вращения количество витков увеличивается, что объясняется ростом неустойчивости системы;

Выяснено, что с ростом расхода газа расстояние между витками газовой спирали увеличивается. Повышение скорости вращения цилиндра при расходах газа до 400 мл/мин не оказывает значительного влияния на расстояние между витками, но с повышением скорости до 600 мл/мин это расстояние значительно уменьшается.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Murai, Y., Oiwa, H., Takeda, Y., 2005. Bubble behavior in a vertical Taylor-Couette flow. J. Phys.: Conf. Ser. 14, 143. https://doi.org/10.1088/1742-6596/14/1/018.

© Т. А. Сапаев, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов, 2026

УДК 532.516
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-160-163

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

Изучение гидродинамики потока в модели аппарата колонного типа с помощью матричной электроимпедансной диагностики

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

Аннотация. Проведено исследование гидродинамики потока с помощью матричного электроимпедансного датчика. Для исследования гидродинамики создан стенд с моделью аппарата колонного типа. Проведено измерение гидродинамики в модели с помощью сетчатого датчика с одним передающим электродом и тремя приемными. В качестве параметра, характеризующего перемешивание в засыпке, использован измерительный скаляр.

Ключевые слова: электроимпедансная диагностика, шаровая засыпка, электрод, раствор соды

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

Study of flow hydrodynamics in a column-type apparatus model using matrix electrical impedance diagnostics

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

Abstract. A flow hydrodynamics study was conducted using a matrix electrical impedance sensor. A rig with a model of a column-type apparatus was built for the hydrodynamics study. Hydrodynamic measurements in the model were conducted using a mesh sensor with one transmitting electrode and three receiving electrodes. A measuring scalar was used as a parameter characterizing mixing in the backfill.

Keywords: electrical impedance diagnostics, ball backfill, electrode, soda solution

Введение

Процессы тепломассообмена играют важную роль во многих областях науки и техники. Их изучение является обязательным этапом проектирования и эксплуатации сложных машин и аппаратов с газожидкостным теплоносителем. Для исследования этих процессов применяются многие известные бесконтактные и контактные методы, такие как визуализация, лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА), метод цифровой трассерной визуализации, томография, термометрия, электрозондирование [1].

Для решения прикладных задач металлургии, в частности, в производстве алюминия, важно понимать поведение полидисперсных пульп. Из-за дороговизны и трудоемкости натурных испытаний исследователи обращаются к компьютерной гидродинамике. Ключевым условием корректности такого моделирования выступает предварительная калибровка алгоритмов по результатам экспериментов на уменьшенных копиях аппаратов. Специфика работы с пульпой заключается в том, что она является непрозрачной многофазной средой, что затрудняет измерения.

В связи с этим, работа направлена на тестирование методики матричной электроимпедансной диагностики в качестве инструмента для изучения трехмерных течений жидкостей (как гомогенных, так и гетерогенных).

Методы и материалы

В основе пространственной кондуктометрии лежит принцип измерения объемного распределения электрофизических характеристик потока – электропроводности и удельной диэлектрической проницаемости. Сбор первичных данных обеспечивают кондуктометрические датчики; их чувствительные зоны могут иметь разнообразную геометрию. В данной работе внимание сосредоточено на сетчатых конструкциях таких датчиков.

Матричный электроимпедансный датчик представляет собой два набора проводящих струн в двух параллельных плоскостях, которые находятся на расстоянии 3 мм друг от друга (рис. 1). На группу струн, находящихся в первой плоскости, подается генерирующий сигнал с разными частотами, группа струн в другой плоскости является приемниками. В итоге получается сетчатый датчик, который позвояет измерять удельную проводимость и удельную электрическую емкость в каждом узле. В результате в пространстве между электродами определяется эффективное значение электрического импеданса исследуемой среды. Электрические характеристики узла находятся путем подключения электрода струны к генератору и последующей регистрации тока в соответствующем приемнике. Это позволяет построить пространственный срез электрических параметров среды, где размещен датчик.

Метод исследования процессов теплопереноса с использованием полевой регистрации электроимпедансных свойств потоков основан на регистрации динамики переноса маркера. Данный метод по своей постановке подобен методам оптической визуализации гидродинамических полей потоков. При визуализации процессов теплопереноса используется контрастный маркер (трассер). Маркер может быть естественным (газовые либо паровые включения в потоке жидкости), либо дополнительно вводиться в поток. При исследованиях двухфазных потоков естественным маркером является одна из фаз (газ, пар). Газовая фаза обладает высоким контрастом диэлектрической проницаемости по отношению к жидкости. Диэлектрическая проницаемость жидкостей обычно в два и более раз превышает диэлектрическую проницаемость газов. В этом случае пространственное распределение или изменение во времени кажущейся диэлектрической проницаемости может использоваться для получения характеристик исследуемого потока.

Исследуя процессы теплопереноса в однофазном потоке можно использовать в качестве маркера любую подходящую по плотности и вязкости жидкость. При этом ее электрические свойства должны отличаются от свойств основного потока. Отличия могут быть выражены в удельной электрической проводимости или в удельной диэлектрической проницаемости. В наших экспериментах в качестве маркера успешно использовался водный раствор соды $NaHCO_3$.

Детальный анализ электроимпедансных характеристик матричного зонда выполнялся на установке, включающей цилиндрический сосуд диаметром 120 мм и высотой 70 мм. Для снятия статистических характеристик датчика сосуд наполнялся дистиллированной водой. Был изготовлен матричный зонд с электродами из нержавеющей стали в форме пластин высотой 3 мм и шириной 1 мм; измерительный зазор между плоскостями возбуждения и регистрации составил 3 мм. Электроды образуют сетку из 36 измерительных узлов (6 х 6) с шагом 20 мм. Вначале использовались один возбуждающий и три приемных электрода – 0, 1 и 2. Засыпка осуществлялась шариками диаметром 2 мм до высот 0, 20 и 40 мм.

После калибровки датчика осуществлялся эксперимент по визуализации массопереноса в режиме реального времени при температуре 23 °С. В точку пересечения возбуждающего и нулевого электродов свободно падала с высоты 70 мм капля раствора соды с концентрацией 200 мг/л. В качестве характеристики концентрации трассера в ячейках сетчатого датчика использовалась безразмерная величина:

$$\varphi = \frac{c_{\text{meas}\,ij} - c_{\text{bulk}\,ij}}{c_{\text{trace}} - c_{\text{bulk}\,ij}},$$

где $c_{\text{meas}\,ij}$ –концентрация электролита в ячейке i,j; $c_{\text{bulk}\,ij}$ – показания замера без примеси в той же ячейке; c_{trace} – концентрация примеси в среде, используемой в качестве трассера. По данным эксперимента строились графики зависимости распределения концентрации трассера от времени. На рис. 2 представлены зависимости величины φ для приемных электродов 0, 1 и 2 от времени при высоте шаровой засыпки 40 мм. Эксперимент длился 10 секунд. Видно, что диффузия метки трассера достигает всех электродов примерно за 6 секунд при засыпке 40 мм. Концентрация трассера максимальна вблизи нулевого приемного электрода.

Результаты выполненных экспериментальных исследований электроимпедансных характеристик матричного датчика показали, что с его помощью можно проводить исследование процессов массопереноса в однофазных средах. В качестве маркера процесса может быть использован раствор пищевой соды. Датчик имеет линейную характеристику зависимости показаний от проводимости среды в широком диапазоне параметров.

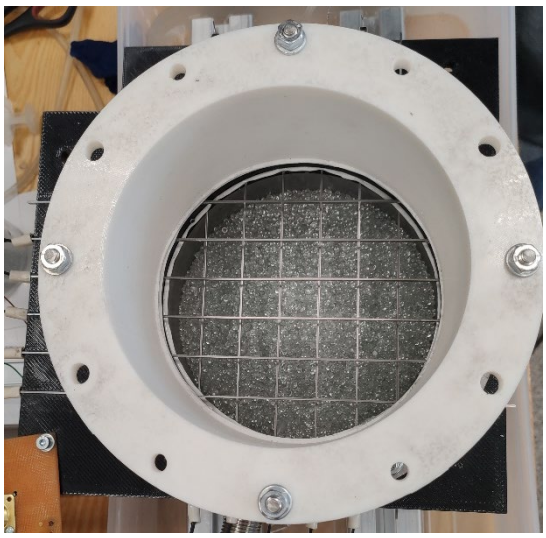


Рис. 1. Общий вид сетчатого датчика

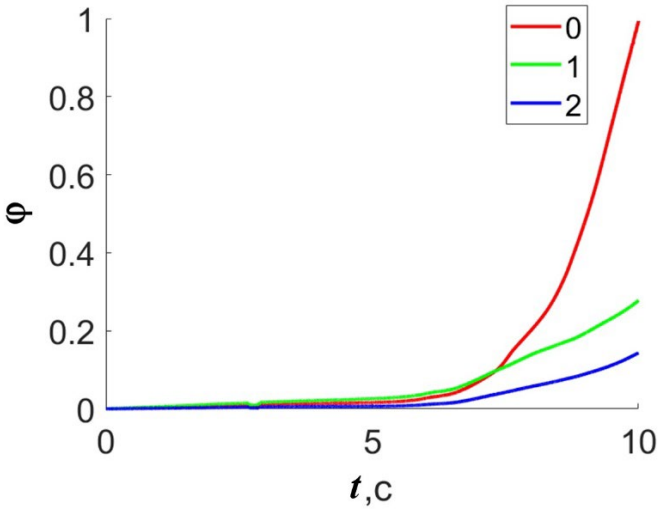


Рис. 2. Дисперсия трассера при высоте засыпки 40 мм

Заключение

Результаты проведенных экспериментов показывают, что с помощью матричного датчика можно проводить исследование процессов массопереноса в однофазных средах. В качестве маркера может быть использован раствор обычной пищевой соды. Датчик имеет линейную характеристику зависимости показаний от проводимости среды в широком диапазоне параметров.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Главный В.Г., Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 247–255.

© И. К. Кабардин, П. Д. Лобанов, В. Г. Главный, М. Р. Гордиенко, 2026

УДК 532.516
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-164-168

К. С. Зубанов[1], И. К. Кабардин[1]✉, В. Г. Мелединн[1], С. В. Двойнишников[1]

Развитие метода ЛДА путем применения кремниевого ФЭУ и упрощенной оптической схемы для диагностики потока через многофазный барьер

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

Аннотация. Проведено развитие метода лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) для исследования потока путем применения упрощенной и более дешевой оптической схемы с использованием светоделительного куба в качестве дифрагирующего элемента. Научной новизной работы также является применение новых, более дешевых и чувствительных кремниевых фотоэлектронных умножителей. Разработан измерительный макет, который был опробован для измерения аэродинамики водного аэрозоля через многофазный барьер на ветроволновом канале в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. Продемонстрировано, что макет показывает хорошие результаты на уровне современных лазерных доплеровских анемометров.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, многофазный поток, кремниевый фотоумножитель, светоделительный куб, оптическая схема

K. S. Zubanov[1], I. K. Kabardin[1]✉, V. G. Meledin[1], S. V. Dvoynishnikov[1]

Development of the LDA method by using a silicon photomultiplier and a simplified optical scheme for flow diagnostics through a multiphase barrier

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

Abstract. The LDA method for flow studies was developed using a simplified and less expensive optical design with a beam-splitting cube as a diffracting element. Another novel feature of the work is the use of new, cheaper and more sensitive silicon photomultiplier tubes. A measurement prototype was developed and tested to measure the aerodynamics of water aerosol through a multiphase barrier in a wind-wave channel at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences in Nizhny Novgorod. The prototype was shown to perform well, comparable to modern laser Doppler anemometers.

Keywords: laser Doppler anemometer, multiphase flow, silicon photomultiplier, beam-splitting cube, optical scheme

Введение

Изучение тепломассообмена актуально в ряде промышленных и научных приложений. Зачастую, исследование теплообмена завязано на изучение гидро- и аэродинамики потоков. Для исследования гидро- и аэродинамики потоков актуально использовать оптические методы исследования, поскольку они не возмущают поток и,

зачастую, имеют низкую погрешность измерения. Среди оптических методов известен метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), одной из проблем использования которого является высокая стоимость анемометров на его основе. Высокую стоимость анемометра, зачастую, обеспечивают дорогостоящие и сложные компоненты в его оптической схеме. Поэтому одним из путей уменьшения стоимости анемометра является использование более простых схем с меньшим количеством элементов и более дешевых узлов.

С развитием современной микроэлектроники появились полупроводниковые аналоги дорогостоящих вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), которые используются при создании измерительных систем. Близким аналогом на сегодняшний день является кремниевый ФЭУ на основе кремниевых микропиксельных лавинных фотодиодов [1]. Однако, их применение в качестве фотоприемников в лазерной анемометрии еще не получило широкого распространения.

Следующим дорогостоящим компонентом оптической схемы являются акустооптические модуляторы – ячейки Брэгга. Акустооптические модуляторы можно заменить светоделительным кубом, который позволяет одновременно разделять исходный луч лазера на два пучка и сводить их в необходимом месте для создания измерительной области. Точка пересечения лучей может быть передвинута путем поворота светоделительного куба.

Цель работы – разработать упрощенную оптическую схему лазерного доплеровского анемометра с применением кремниевого фотоэлектронного умножителя взамен классического вакуумного ФЭУ и опробовать ее при измерении аэродинамики водного аэрозоля через многофазный барьер на ветроволновом канале в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород.

Методы и материалы

Принцип метода лазерной доплеровской анемометрии основан на эффекте Доплера – изменении частоты лазерного излучения при его рассеянии движущимися частицами в измерительном объеме. Измерительный объем образуется в области пересечения двух когерентных лазерных пучков. Длина измерительной области, как правило, не превышает 2 мм. В модели «интерференционных полос» в измерительном объеме формируются параллельные плоскости с высокой интенсивностью света вследствие интерференции лазерных пучков. Затем на фотодетекторе регистрируется модуляция интенсивности светового поля при пересечении частицей измерительного объема.

Зная длину волны лазерного излучения (λ), и угол пересечения двух световых пучков (θ), расстояние между полосами (d_f) может быть определено при помощи выражения: $d_f = \frac{\lambda}{2}\sin\frac{\alpha}{2}$. Изменение частоты при рассеянии света от пролетающей в измерительной области частицы зависит от компоненты скорости частицы (V), параллелбной вектору чувствительности (K) оптической системы.

Вектор чувствительности перпендикулярен оптической оси ЛДА. Доплеровский сдвиг частоты может быть выражен как $\omega_D = 2kV \sin\frac{\alpha}{2}\cos\varphi$.

На рис. 1 и 2 приведены оптическая схема и фотография прототипа лазерного доплеровского анемометра, применявшегося в данной работе. В основе прибора лежит светоделительный куб. Излучение лазера (1) с длиной волны $\lambda = 633$ нм передается на систему фокусирующих линз (2, 3), которые отвечают за формирование перетяжки пучка. Варьируя комбинацию и положение линз, можно смещать положение перетяжки вдоль оси лазерного луча, что обеспечивает точную настройку схемы. Далее пучок попадает на кубический светоделитель (4), где расщепляется на два когерентных луча. Именно положение светоделительного куба и его поворот относительно оптической оси задают точку пересечения этих лучей. Разделенные лучи пересекаются в измерительной области, образуя интерференционную картину с известной пространственно-временной периодичностью.

Линзы (5, 6) служат для сбора света, рассеянного частицами. Рассеянное назад излучение направляется на кремниевый лавинный фотодетектор с микропиксельной структурой (7).

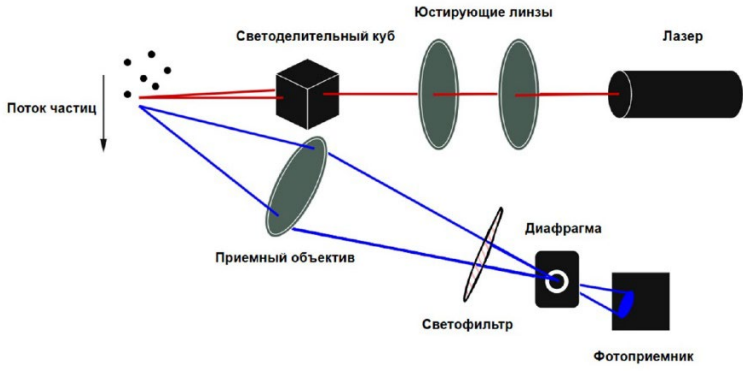


Рис. 1. Оптическая схема лазерного анемометра на основе светоделительного куба и кремниевого фотоумножителя

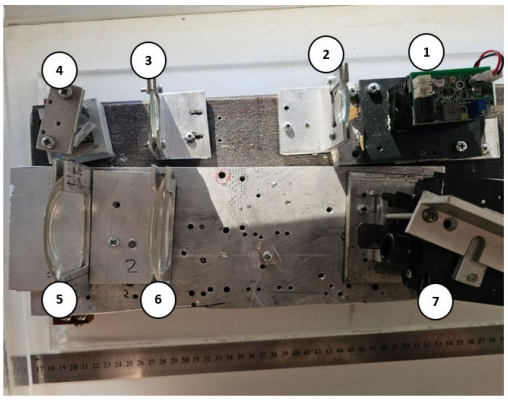
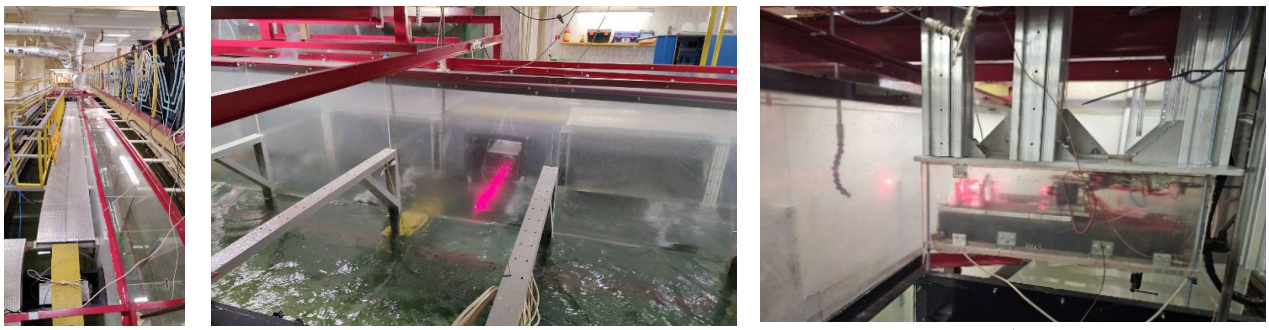


Рис. 2. Фотография разрабатываемой оптической схемы лазерного анемометра

Макет лазерного доплеровского анемометра на основе светоделительного куба и кремниевого фотоэлектронного умножителя был использован для измерения распределения скоростей капель в потоке на различных высотах в ветроволновом канале (рис. 3в).



а) б) в)

Рис. 3. Фотографии:
а) ветроволнового канала, б) лазерного доплеровского измерителя скорости ЛАД-05 на канале, в) разработанного макета на основе светоделительного куба и кремниевого фотоумножителя на ветроволновом канале

Результаты

Измерения проводились совместно с использованием лазерного доплеровского анемометра «ЛАД-05» производства «ИОИТ», г. Новосибирск. Сначала цикл измерений продольной скорости потока вдоль канала проводился при помощи серийного лазерного доплеровского анемометра, затем на его место устанавливался разработанный макет лазерного доплеровского анемометра на основе упрощенной оптической схемы, и проводился тот же самый цикл измерений в аналогичных точках. Получены профили скорости в канале (рис. 4) и гистограммы распределения скорости частиц в канале при фиксированной скорости потока (рис. 5).

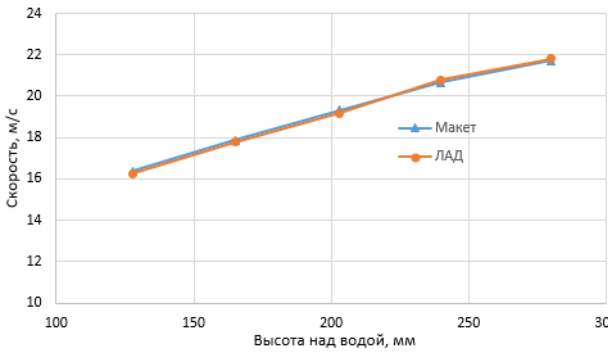


Рис. 4. Профили скорости частиц в канале, измеренные при помощи разрабатываемой оптической схемой и классического ЛДА

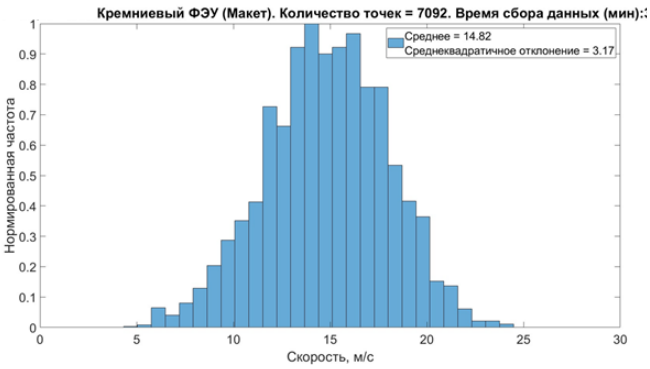


Рис. 5. Гистограмма распределения скорости, полученная при помощи прототипа ЛДА на основе кубического светоделителя и кремниевого фотоумножителя

Результаты сравнительных измерений показали отличие до 1% значений средних скоростей потока в канале, полученных при помощи серийного и разрабатываемого анемометров. Полученные данные демонстрируют, что разработанный макет

измерительной системы пригоден для экспериментальных исследований аэродинамики потока аэрозольных капель применительно к диагностике потока через многофазный барьер.

Заключение

Применение светоделительного куба и кремниевого фотоэлектронного умножителя позволило упростить и удешевить оптическую схему лазерного доплеровского анемометра без существенного ухудшения метрологических характеристик. Проведены измерения распределений скорости частиц на ветроволновом канале в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. Приведены сравнения профилей скорости частиц, полученные при помощи двух различных оптических схем лазерных доплеровских анемометров. Результаты демонстрируют работоспособность макета доплеровского анемометра применительно к изучению тепломассообмена.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке госзадания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yu.I. Troitskaya, A. Kandaurov, O. Ermakova, D. Kozlov, D.A. Sergeev and S. Zilitinkevich, The "Bag breakup" spume droplet generation mechanism at high winds. Part I: spray generation function, Journal of physical oceanography, 2018, Vol. 48, No 9, P. 2168–2188.

2. Rakhmanov V. V., Kashkarova M. V., Kakaulin S. V., Zubanov K. S., Dvoynishnikov S. V. Analysis of the limits of applicability of photomultipliers as part of a laser Doppler anemometer. Izmeritel’naya Tekhnika, 73(6), 32–39 (2024). https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-32-39.

© К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, В. Г. Меледин, С. В. Двойнишников, 2026

УДК 536.24
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-169-173

К. А. Филиппский[1]✉, И. А. Евдокименко[1], П. Д. Лобанов[1]

Влияние формы преграды на структуру двухфазного нисходящего течения в прямоугольном канале

[1]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: fill2004kirill@gmail.com

Аннотация. В работе исследовано влияние прямоугольных преград на гидродинамическую структуру и перепад давления в двухфазном нисходящем течении в плоском канале. Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов PIV и теневой съемки при числах Рейнольдса Re = 10000–15000 и расходном газосодержании 1–3 %. Проанализированы особенности формирования зон отрыва потока и распределения давления вблизи препятствий. Установлено, что введение преграды в поток приводит к формированию трех характерных областей отрыва. Показано, что геометрические размеры преграды существенно влияют на пространственные характеристики газожидкостной структуры, в частности, определяя протяженность зон, обедненных пузырьковой фазой.

Ключевые слова: двухфазные потоки, пузыри, перепады давления, системы кондиционирования воздуха, системы жизнеобеспечения летательных аппаратов

K. A. Filippskii[1]✉, I. A. Evdokimenko[1], P. D. Lobanov[1]

Influence of obstacle geometry on the structure of two-phase downward flow in a rectangular channel

[1]Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: fill2004kirill@gmail.com

Abstract. The study investigates the influence of rectangular obstacles on the hydrodynamic behavior and pressure drop in a two-phase downward flow in a rectangular channel. The experiments were conducted using PIV and shadow imaging techniques at Reynolds numbers Re = 10,000–15,000 and gas volume fractions of 1–3%. The features of the formation of flow separation zones and pressure distribution near obstacles are analyzed. It is established that the introduction of an obstacle into the flow leads to the formation of three characteristic separation regions. It is shown that the geometric dimensions of the barrier significantly affect the spatial characteristics of the gas-liquid structure, in particular, determining the extent of zones depleted by the bubble phase.

Keywords: two-phase flows, bubbles, pressure drops, air conditioning systems, aircraft life support systems

Введение

Двухфазные газожидкостные течения широко применяются в авиационной, энергетической и машиностроительной промышленности. Особую актуальность представляет исследование таких течений для систем кондиционирования воздуха (СКВ) летательных аппаратов, поскольку эффективность их работы напрямую влияет на надежность и безопасность эксплуатации авиационной техники.

В элементах СКВ часто встречаются участки с резким изменением поперечного сечения трубопроводов и воздуховодов теплообменников, что может приводить к возникновению отрывных течений. Образование зон рециркуляции и локальных вихревых структур сопровождается увеличением гидравлических потерь и возникновением пульсаций давления, оказывающих негативное влияние на стабильность работы системы.

Гидродинамическая структура газожидкостных потоков существенно зависит от ориентации канала и направления течения [1]. Установка в канале преград, моделирующих изменение его поперечного сечения, кардинально изменяет картину течения. В литературе подробно описано влияние подобных элементов на перепад давления и теплообмен в однофазных потоках воздуха [2]. Однако для двухфазных нисходящих течений количество таких исследований остается крайне ограниченным. Между тем наличие преград в двухфазном потоке может приводить к возникновению отрыва потока, локальных завихрений и перераспределению газовой фазы, что способно существенно влиять на гидродинамическую структуру течения, теплообмен и устойчивость работы системы в целом.

В связи с этим актуальной задачей является исследование влияния геометрии преград на характеристики двухфазных нисходящих течений. Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния формы прямоугольной преграды на гидродинамическую структуру потока и перепад давления в двухфазном нисходящем течении в плоском канале.

Методы и материалы

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый гидродинамический контур с рабочим участком в виде прямоугольного канала из оргстекла размерами 200×16×1450 мм (рис. 1). Движение рабочей жидкости в канале осуществлялось сверху вниз, формируя нисходящее течение. Циркуляция жидкости обеспечивалась центробежным насосом. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Подача газа в поток осуществлялась через кольцевой диспергатор, установленный во входной секции канала. Диспергатор состоял из 32 капилляров диаметром 0,3 мм, обеспечивающих генерацию пузырькового потока. Для моделирования локального изменения поперечного сечения канала на стенке рабочей секции устанавливались прямоугольные преграды размерами 10×8 мм и 20×8 мм (см. рис. 2). После прохождения рабочего участка жидкость возвращалась в накопительный бак, обеспечивая замкнутый режим циркуляции.

Экспериментальные исследования проводились при числах Рейнольдса жидкой фазы в диапазоне от 10000 до 15000 и расходном газосодержании от 1 до 3 %. Для исследования гидродинамической структуры двухфазного течения применялись методы PIV-визуализации и теневой съемки.

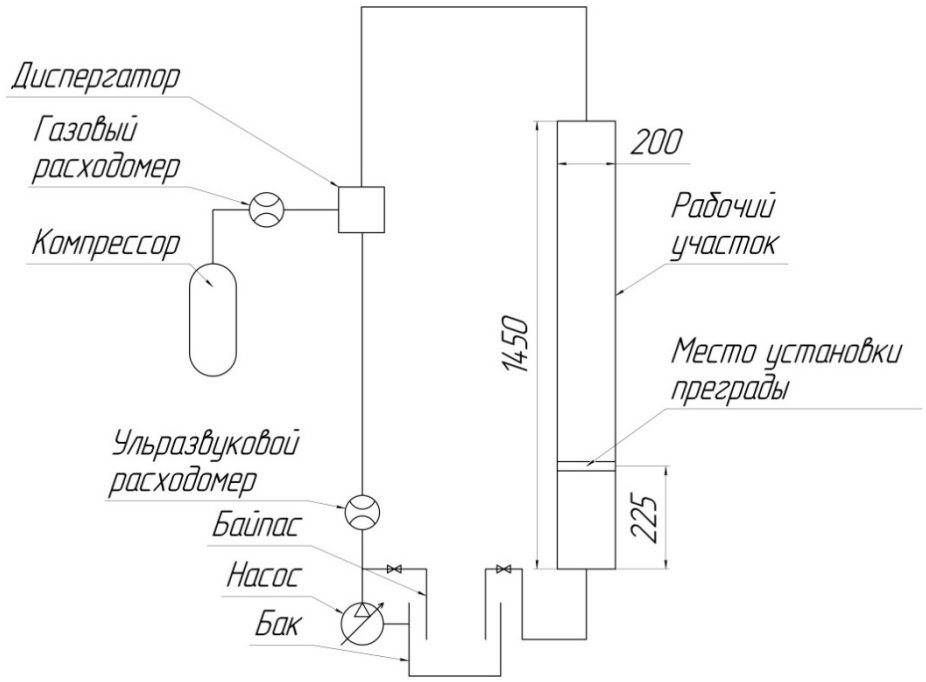
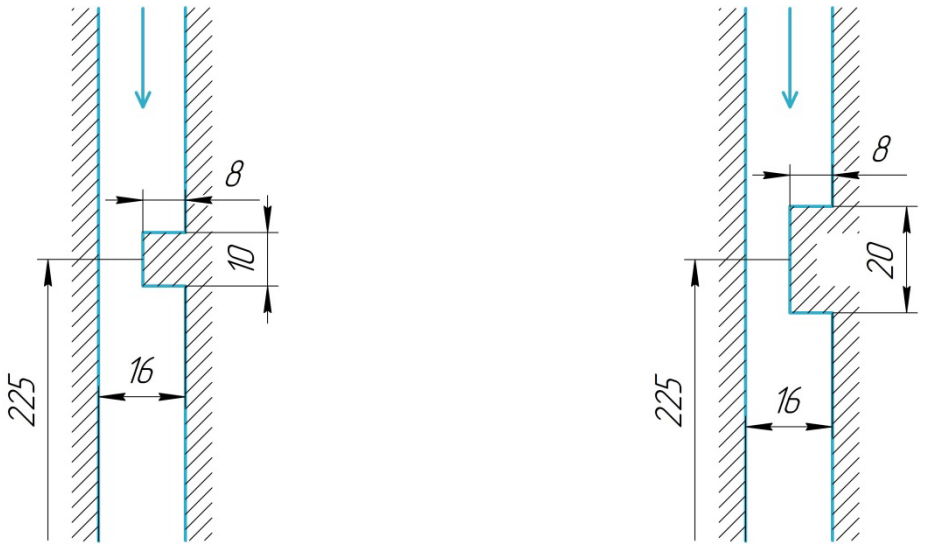


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



а) б)

Рис. 2. Геометрическая форма преград

Результаты

Были получены данные о распределении скорости жидкости в однофазном потоке до и после преграды размером 10х8 мм с помощью цифровой трассерной визуализации. Также были получены теневые изображения газовых пузырей для двух форм преград.

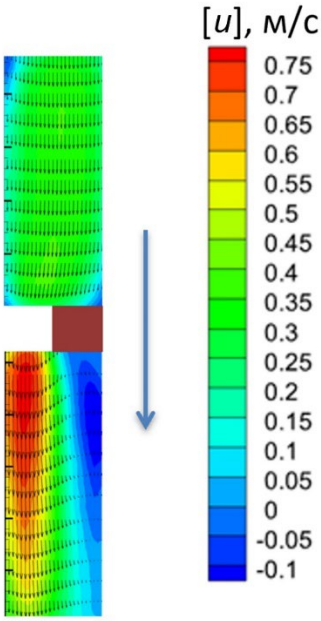


Рис. 3. Распределение скорости жидкости в однофазном потоке в канале с преградой 10х8 мм при ReH=10000

Обсуждение

При введении в канал преграды создается зона резкого сужения и резкого расширения канала. Непосредственно за преградой формируется зона отрыва потока с областью рециркуляции, в которой скорость жидкости снижается вплоть до появления обратных течений. Поля скорости показаны на рис. 3. Основной поток смещается к противоположной стенке канала, где происходит увеличение локальной скорости вследствие сужения эффективного проходного сечения.

По мере удаления от преграды течение постепенно восстанавливается: размеры рециркуляционной зоны уменьшаются, профиль скорости становится более равномерным, а максимум скорости смещается обратно к центральной части канала.

Установлено, что как перед преградой, так и за ней формируются области, практически полностью свободные от газовой фазы. Их пространственная протяженность существенно зависит от геометрии препятствия. Для широкой преграды (20×8 мм) протяженность зоны без пузырей в следе за препятствием достигает 4–5 высот преграды, что указывает на формирование развитой области отрыва и последующего восстановления течения. При этом перед преградой формируется небольшая зона, не превышающая одной высоты препятствия.

С уменьшением характерного размера преграды наблюдается перераспределение структуры обтекания: область, свободная от пузырьков перед препятствием, увеличивается до 2 высот, тогда как зона за преградой, напротив, сокращается до величины порядка одной высоты. Для преграды малых размеров при низких значениях числа Рейнольдса (ReH) зона свободной от газа жидкости практически не формируется.



а) б)

Рис. 4. Визуализация нисходящего пузырькового течения при ReH=10000 и β=1% для преград: а) 10х8 мм; б) 20х8 мм

Заключение

Было проведено экспериментальное исследование влияния размера одиночной преграды на структуру газожидкостного опускного нисходящего течения в плоском канале:

– проведено исследование структуры и перепадов давления в двухфазном пузырьковом течении в канале с преградами различных геометрических характеристик в диапазоне ReH от 7 500 до 15 000 при газосодержании от 0 до 3%;

– выяснено, что при прохождении преграды газовые пузыри в нисходящем течении двигаются, не прижимаясь к стенке, на которой установлена преграда, в отличии от восходящего течения, где пузыри двигаются вдоль стенки под преградой;

– выяснено, что с уменьшением ширины преграды зона свободной от пузырей жидкости после преграды уменьшается, но растет перед преградой.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dabiri, S.; Tryggvason, G. Heat transfer in turbulent bubbly flow in vertical channels // Chemical Engineering Science. 2015. №122. P. 106–113.

2. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. № 46. P. 4535−4551.

© К. А. Филиппский, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов, 2026

УДК 67.02
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-174-180

Д. Д. Болотов[1]✉

Постобработка деталей, изготовленных методом стереолитографии

[1]АО «Научно-исследовательский институт электронных приборов»,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: bddr.niiep@gmail.com

Аннотация. В современном мире широко распространена технология изготовления изделий и деталей при помощи процесса фотополимеризации в ванне и после завершения цикла построения для получения требуемых технических и эксплуатационных характеристик требуется провести ряд технологических операций. При это рекомендации по постобработке подаются как ориентировочные величины и не могут гарантировать конечный результат. Комплексные методики для оценки эффективности технологических методов постобработки могут позволить в наиболее объективном виде проанализировать получаемые характеристики, оценить оптимальность подбора последовательности и режимов для удовлетворения заданным требованиям. В данной работе представлен метод для проведения анализа технологии и некоторые частные решения широко распространенных проблем.

Ключевые слова: 3D печать, постобработка, технологический метод

D. D. Bolotov[1]✉

Post-processing of parts manufactured using stereolithography

[1]JSK «Scientific Research Institute of Electronic Devices», Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: bddr.niiep@gmail.com

Abstract. In today's world, manufacturing products and components using vat photopolymerization is widely used. After the construction cycle is complete, a series of process steps are required to achieve the required technical and operational characteristics. Post-processing recommendations are provided as guidelines and cannot guarantee the final result. Comprehensive methodologies for assessing the effectiveness of post-processing methods can provide a more objective analysis of the obtained characteristics and evaluate the optimal selection of sequences and modes to meet specified requirements. This article presents a method for conducting process analysis and some specific solutions to common problems.

Keywords: 3D print, post-processing, technological method

Введение

При изготовлении деталей при помощи технологии фотополимеризации в ванне [1] из фотополимерных смол, с использованием методов стереолитографии (SLA), отверждения под воздействием излучаемого света, избирательно пропускаемого через LCD маску (LCD), отверждения под воздействием излучаемого света, избирательно направляемого при помощи проектора (DLP) [2] необходимо провести ряд технологических операций после завершения цикла построения для получения требуемых технических и эксплуатационных характеристик.

Ключевыми технологическими операциями постобработки принято считать механическое или химическое удаление поддержек, используемых для построения изделия, удаление с поверхности изделия материала, не использованного при его изготовлении. Далее в зависимости от материала и производителя могут быть рекомендованы циклические или статические режимы термообработки, сушки, финишная полимеризация, необходимая для конечного всестороннего отверждения изделия и придания ему заданных технических характеристик.

По данному вопросу зачастую публикуются небольшие статьи прикладного характера на сайтах лиц, предоставляющих услуги самой печати или оборудование и материалы для покупки, в связи с чем наиболее актуальная информация обновляется достаточно быстро, но не проходит строгой редакции и подается в форме кратких выводов.

Некоторые производители или продавцы рекомендуют технологические методы и режимы их применения для постобработки напечатанного изделия, в большом количестве случаев рекомендуются промывка в спирте этиловом или изопропиловом, сушка в нормальных условиях, термообработка с заданными характеристиками, дозасветка в специальной камере [3].

При промывке изделий в спирте возникают проблемы, связанные с предельно допустимой концентрацией вещества в рабочей зоне, его низкой температурой вспышки, что накладывает значительные ограничения на оборудование и помещение в соответствии с требованиями пожарной и промышленной безопасности.

Данные проблемы решаются при помощи специальных средств для промывки, каждое из которых желательно использовать в соответствии с рекомендациями производителя.

Материалы, способные поглощать и удерживать жидкости из окружающей среды, при использовании промывки в спирте в зависимости от конфигурации изделия могут терять свои механические свойства, габариты, формы. В частных случаях, для возвращения к изначальному или близкому к нему состоянию, может потребоваться дополнительная сушка.

Для установления пригодности технологических методов постобработки необходимо провести комплекс мероприятий, направленных на проверку характеристик, требуемых от изделия. В случае отсутствия специальных требований к изделию необходимо произвести контроль заданных размеров и формы на различных этапах производства изделия, например, измерение габарита и формы после печати и до проведения постобработки, сразу после проведения промывки, после окончания полного цикла технологических операций. Такой подход даст представление, например, об абсолютной усадке данного изделия, отклонении от параметров, заданных в CAD модели или отклонении параметров при проведении отмывки, в связи с чем может также возникнуть необходимость наложения дополнительных ограничений на технологический метод постобработки.

Вышеуказанные данные могут сократить время, необходимое на подбор оптимальных режимов технологических методов постобработки, а также повысить среднее качество изготовления заданного изделия. Последнее обусловлено боль-

шей прогнозируемостью конечного результата и упрощением подбора параметров постобработки осуществляемого по аналогии с отработанными технологиями.

Методы и материалы

При исследовании использовались материалы: фотополимер HARZ Labs “Industrial ABS” (далее фотополимер), спирт этиловый технический гидролизный ректификованный любой марки ГОСТ Р 55878 (далее спирт этиловый), спирт изопропиловый любой марки ГОСТ 9805 (далее спирт изопропиловый), смесь спирто-бензиновая (1к1), концентрат HARDLIGHT CLEANER PH11 (средство для промывки).

Контроль размеров и формы изделий выполняется при помощи измерительного инструмента, соответствующего необходимой, но достаточной точности измерения. В нашем случае при изготовлении образцов, пригодных для испытания на сжатие в соответствии с ГОСТ 4651, размерами 30±0,2, 10±0,2; 4±0,2 достаточной точностью измерений было принято 2 знака после запятой, для чего использовался штангенциркуль цифровой с дискретностью измерений 0,01 мм.

Образцы для испытаний, по возможности, необходимо изготовить за один цикл построения.

При контроле необходимо производить замеры не менее трех раз по каждому размеру. При возникновении паттерна отклонений размеров в зависимости от места проведения замера стоит вынести данный размер отдельно с подробным описанием принципа замера. Также, учитывая возможность корректировки управляющей программы при возникновении прогнозируемого паттерна, стоит оценить возможность программной компенсации данного отклонения. При появлении возможности компенсации оценить математическое ожидание полученной величины, отклонений относительно нее и внести корректировку в программу.

Замеры после печати необходимо производить на образцах после слива излишнего фотополимера, допускается протереть изделия перед измерением. Образцы требуется маркировать порядковыми номерами в любой последовательности для дальнейшего использования.

Для измерения образцов после проведения операции отмывки необходимо выделить по 3 изделия для каждой среды нахождения образцов в соответствии с технологией. Далее для каждой среды нахождения стоит установить время пребывания образцов и при необходимости температуру.

Для спирта этилового, спирта изопропилового, смеси спирто-бензиновой были выбраны интервалы в 5, 10, 15 минут без изменения температуры, для средства для промывки 15, 20, 30 минут при включенном подогреве до 40±5 °С.

Далее для измерения после операции сушки выбрать по одному образцу из каждой среды промывки для проведения сушки в нормальных условиях в течение времени от 30 до 60 минут, остальные сушить при температуре 35±5 °С в течение времени от 10 до 20 минут.

Прочностные испытания на сжатие проводятся для оценки относительных показателей механических характеристик и определения наличия или отсутствия корреляции параметров образца и технологии постобработки.

Образец для испытания подвергают сжатию вдоль его главной оси с постоянной скоростью до разрушения или до тех пор, пока нагрузка или уменьшение длины не достигнет заданного значения. Нагрузка, которую прикладывают к образцу, измеряют в течение всего процесса испытания [4].

Первая величина, интересующая нас, это – напряжение при сжатии, вычисляют по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \tag{1}$$

где: F – нагрузка при сжатии, Н;

A – начальная площадь поперечного сечения, мм^2.

Затем нужно оценить относительную деформацию, вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}, \tag{2}$$

где: ΔL_0 – изменение расчетной длины образца, мм;

L_0 – расчетная длина испытуемого образца, мм.

И наконец можно получить модуль упругости, вычисляют по формуле:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \tag{3}$$

где: σ_2 – напряжение при сжатии, при значении относительно деформации ε_2;

σ_1 – напряжение при сжатии, при значении относительно деформации ε_1.

Из этих значений мы хотим получить отношение данных параметров к некоторому эталонному значению, принятому в соответствии отработанной технологией. Так как получаемые величины относительны, приложены к образцам, а не конечным изделиям и в данном испытании опущены силы трений между образцом и площадками испытательной машины, а также изменяющаяся геометрия тела и возникающие диссипативные силы при деформации.

Результаты

Результаты замеров 12 образцов до отмывки показали, что абсолютная величина относительного отклонения от ожидаемой величины (далее относительное отклонение) в среднем составляет 0,284 % и абсолютная величина линейного отклонения от ожидаемой величины (далее линейное отклонение) равно 0,034 мм. Абсолютная величина относительного отклонения от математического ожидания реальной величины (далее относительное отклонение ожидания) в среднем составляет

0,24 % и абсолютная величина линейного отклонения от математического ожидания реальной величины (далее линейное отклонение ожидания) равно 0,028 мм.

Результаты замеров образцов, помещенных в спирт этиловый, изопропиловый, смесь спирто-бензиновую в зависимости от времени практически не имеют разницы между собой при оценке отклонения от заданного размера. Для спирта этилового отклонение наименьшее - 0,14 мм, для смеси спирто-бензиновой наибольшее 0,16 мм, относительное отклонение составляет 1 %, линейное отклонение - 0,149 мм, относительное отклонение ожидания - 0,59 % и линейное отклонение ожидания - 0,09 мм. Средство для промывки показало относительное отклонение равное 0,7 %, линейное отклонение - 0,105 мм, относительное отклонение ожидания - 0,41 % и линейное отклонение ожидания - 0,065 мм.

Результаты замеров образцов после сушки вне зависимости от технологии не имеют значимого отличия, относительное отклонение составляет 0,3 %, линейное отклонение - 0,032 мм, относительное отклонение ожидания - 0,22 % и линейное отклонение ожидания - 0,018 мм.

При испытании на сжатие выходным параметром является график зависимости нагрузки (F, кН) от времени (S, с) с заданной скоростью перемещения (5 мм/мин) пластин испытательной машины, указанный на рис.1.

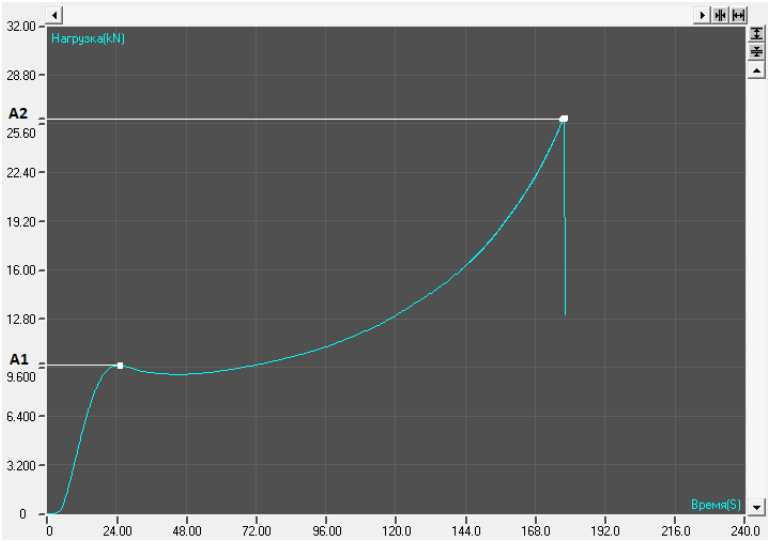


Рис. 1. График зависимости нагрузки от времени,

где: А1 – точка нагрузки, соответствующая пределу текучести, кН;

А2 – точка нагрузки, соответствующая разрушению, кН.

Для всех образцов напряжение при сжатии при пределе текучести в среднем составило 61,2 МПа при среднем отклонении ±3 %, максимальном отклонении 5 %, относительная деформация ровняется 6,5 %. Разрушающее напряжение при сжатии в среднем составило 148,5 МПа при среднем отклонении ±7 %, максимальном отклонении 12 %, относительная деформация составила 42,4 %. Модуль упругости образцов составил 1,56 ГПа при среднем отклонении ±4 % и максимальном отклонении 9 %.

Обсуждение

Из первых замеров можно получить вывод о реальном размере деталей относительно ожидаемых для возможной корректировки CAD модели, используемой для печати или внесения корректировки в управляющую программу. Учитывая величину отклонения корректировка в зависимости от требований к исполнению может и не понадобиться. В нашем случае отклонение близко по значению к погрешности измерительного инструмента.

Замеры образцов после промывки показали, что рекомендованные средства, являющиеся ЛВЖ, в большей степени проникают в поверхность детали чем средство для промывки. Так же стоит отметить такое расширение детали при проектировании тонкостенных деталей или деталей большого удлинения. При этом качество промывки можно считать идентичным для всех перечисленных средств, что говорит о взаимозаменяемости методов.

Результаты замеров образцов после сушки показали значения с наименьшим отклонением от ожидания реальной величины, а также не выявили разницы для различных методов сушки, что говорит об их взаимозаменяемости. Так как размер после сушки является конечным, корректировку наиболее правильно проводить в соответствии с данными размерами и их отклонениями.

Результаты испытаний на сжатие показали, как практические показатели в виде параметров относительных (виду оценки на специальных образцах) напряжения, деформации и модуля упругости, так и теоретически подтвердили отсутствие корреляции между отклонениями параметров и методами постобработки.

Благодаря вышеперечисленным этапам мы можем утверждать, что при использовании различных методов промывки мы получаем схожие результаты как по визуальному контролю чистоты изделия, так и по получаемым параметрам. Это позволяет отказаться от использования ЛВЖ и ГЖ хотя и в сторону увеличения времени обработки каждой детали, но ввиду возникшей возможности работы с ваннами большего объема и применения активных методов промывки позволит увеличить одновременную загрузку оборудования и сократить время цикла промывки. Так же решаются проблемы сложности работы с ЛВЖ и ГЖ, возникновения дополнительных пожарных, санитарных и промышленных требований к оборудованию и помещению.

Заключение

Для достижения требуемых параметров конечного изделия требуется учитывать множество особенностей методов, используемых при изготовлении и постобработке. Подбор правильных методик постобработки изделий не менее важен подбора параметров печати, а иногда даже является наиболее комплексным технологическим решением.

Данный метод не только позволил подобрать наиболее эффективные методики, быстрые или легко реализуемые методики постобработки деталей, но и указал конкретные получаемые параметры, при помощи которых упрощается в том числе проектирование самого изделия из данного материала.

При проведении данной методики испытаний и правильных интерпретации и оформлении полученных данных можно с уверенность утверждать о повторяемости и однообразии результата при каждом изготовлении, в том числе и при испытании готовых изделий, а не только образцов.

Благодарности

Выражаю искреннюю благодарность специалистам бюро технического контроля и технологического бюро отдела технического контроля, лаборатории химического анализа, отдела опытно-конструкторских работ АО «НИИЭП» за участие в проведении испытаний и предоставление своих профессиональных навыков и необъемлемого опыта при проведении работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальный стандарт Российской Федерации Аддитивные технологии. БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ. Термины и определения. ГОСТ Р 57558-2025 (ISO/ASTM 52900:2021, Additive manufacturing - General principles -Fundamentals and vocabulary, MOD), Москва, Российский институт стандартинформ, 2025.

2. SLA/DLP/LCD технология 3D печати и ее применение [электронный ресурс]. – URL: https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/sla-dlp-lcd-tekhnologiya-3d-pechati-i-ee-primenenie (дата обращения: 07.04.2026).

3. Постобработка фотополимеров HARZ Labs [электронный ресурс]. – URL: https://harzlabs.ru/support/finishing/how-long-do-i-post-cure-my-prints (дата обращения: 07.04.2026).

4. Межгосударственный стандарт. ПЛАСТМАССЫ. Метод испытания на сжатие. ГОСТ 4651—2014 (ISO 604:2002, MOD), Москва, Стандартинформ, 2014.

© Д. Д. Болотов, 2026

УДК 621.396.96
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-181-186

И. Д. Гельбутовский[1,2]✉, Л. В. Шебалкова[1,2]

Обнаружение БПЛА с малой ЭПР на основе технологий MIMO и адаптивного формирования луча

[1]АО «Научно-исследовательский институт электронных приборов»,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ivangelbutovsky@yandex.ru

Аннотация: В статье исследуются современные векторы развития радиолокации применительно к труднозаметным дронам. Рассмотрены многоантенные системы (MIMO) и методики пространственной фильтрации, благодаря которым повышаются детальность картинки, устойчивость к шумам и точность классификации. Акцентируется их работоспособность в неблагоприятной электромагнитной обстановке. Указывается, что внедрение нейросетей и цифрового формирования луча дает импульс к созданию высокоинтеллектуальных комплексов. Статья полезна как сводка базовых принципов построения подобного оборудования и текущих достижений в оптимизации его тактико-технических характеристик.

Ключевые слова: БПЛА, радиолокационные системы, MIMO-радар, обнаружение, ЭПР

I. D. Gelbuotovsky[1,2]✉, L. V. Shebalkova[1,2]

Detection of low-rcs uavs based on mimo and adaptive beamforming technologies

[1]JSC «Research Institute of Electronic Devices», Novosibirsk, Russian Federation
[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ivangelbutovsky@yandex.ru

Abstract: This article explores modern radar development vectors for low-observable drones. It examines multiple-antenna (MIMO) systems and spatial filtering techniques that improve image detail, noise immunity, and classification accuracy. Their performance in adverse electromagnetic environments is emphasized. It notes that the introduction of neural networks and digital beamforming provides impetus for the creation of highly intelligent systems. The article provides a useful overview of the basic design principles of such equipment and current advances in optimizing its performance characteristics.

Keywords: UAVs, radar systems, MIMO radar, detection, RCS

Введение

Повсеместное использование дронов принесло прогресс как в область наблюдения, так и в сферу безопасности. Но те же самые аппараты, обладающие низкой радиолокационной заметностью, превратились в серьезную проблему для устаревших радарных станций. Чтобы преодолеть это ограничение, активно внедряются концепции MIMO и технологии формирования луча, которые дают

качественный скачок в детализации воздушной обстановки и достоверности определения типов целей.

Технология MIMO в радиолокационных системах

MIMO-радары строятся на принципе многоканального приема-передачи, и именно это кардинально отличает их от классических схем – в первую очередь, по информативности формируемого изображения и устойчивости канала. Эффект достигается путем искусственного разнесения излучений во времени и в пространстве, благодаря чему объекты начинают различаться гораздо отчетливее, а внешние наводки эффективно гасятся. Однако нельзя не упомянуть и оборотную сторону: подобные системы крайне чувствительны к малейшим фазовым рассогласованиям и ошибкам установки антенн, что может нивелировать преимущества при большой плотности элементов. В табл. 1 приведен сравнительный расклад по обеим технологиям (в расчете на одинаковый уровень сложности реализации).

Таблица 1. Сравнение MIMO и обычных радиолокационных систем

Характеристики	MIMO-радар	Классический радар
Конфигурация антенны	Несколько передающих и приемных антенн	Одна передающая и приемная антенна
Разнообразие сигналов	Высокий (из-за множества независимых путей)	Ограниченный
Пространственное разрешение	Выше (может различать близко расположенные объекты)	Ниже
Идентификация цели	Улучшено (за счет разнообразия форм волн)	Стандартный
Устойчивость к помехам	Более высокий уровень (больше точек данных для обработки)	Слабее
Отношение сигнал/шум	Улучшенный	Стандартный
Применение в сложных средах	Более эффективно (благодаря преимуществам пространственного мультиплексирования)	Менее эффективен

Ряд публикаций закладывает теоретическую базу для применения MIMO в сложных многолучевых средах. В [1] авторы делают ставку на разделение сигналов по частоте и времени – якобы так объекты лучше различаются. В [2] же главным считают адаптивную фильтрацию, она, мол, от внешних наводок спасает. Работа [3] интересна тем, что авторы не просто сравнивают совместные и статистические схемы, а еще и сам термин «статистический MIMO» вводят в оборот. В [4] к этому добавляются фазированные версии – авторы показывают, что разрешение и устойчивость растут. В остальном массиве литературы тоже много

чего: и взаимодействие систем, и адаптивные системы, и антенны с компрессионным считыванием. Из практики – чаще всего это автомобильные радары, морские системы и поиск малозаметных объектов.

Технология формирования луча в радиолокационных системах

По сути, пространственная селекция – это просто управление фазами и амплитудами на элементах решетки, табл. 2 это хорошо показывает.

Таблица 2. Классификация методов формирования луча

Основной метод	Способ работы	Модель работы
Узкополосное формирование луча	Использует один частотный диапазон, как правило, с фазовым сдвигом для определения направления луча.	Переключаемое формирование луча; Адаптивное формирование луча; Аналоговое формирование луча; Цифровое формирование луча
Широкополосное формирование луча	Обрабатывает широкий частотный диапазон, требуя сложной обработки для учета различных задержек сигнала в этом спектре.	Частотно-зависимое формирование луча; Формирование луча во временной области; Пространственно-доменное формирование луча

Раньше использовали классические схемы, но потом перешли на гибридные, и в миллиметровом диапазоне это дало отличный результат: спектр стали использовать намного эффективнее. Если берем несколько MIMO-радаров, работающих вместе, то здесь такой подход позволяет найти золотую середину между тем, как далеко система видит, и тем, насколько качественно она передает данные. Параллельно всегда возникает вопрос, какую полосу частот брать. Узкая полоса (см. параметры в табл. 3) хороша там, где нужна высокая точность – сопровождение, метеорология, дроны. Широкую полосу подключают уже в сложных ситуациях: стены, плотная застройка, где важны мелкие детали. Но для большинства задач по дронам пока выбирают первый вариант – узкая полоса дает более четкую привязку к координатам.

Таблица 3. Методы формирования узкого луча и их применение в радиолокационных системах

Метод	Применение в радиолокационных системах	Преимущества
Переключаемое формирование луча	Секторное сканирование и наблюдение.	Быстро переключается между предустановленными лучами для быстрого охвата территории.
Адаптивное формирование луча	Сопровождение цели в переменных условиях.	Динамически регулирует направление лучей для оптимального приема сигнала и снижения помех.
Аналоговое формирование луча	Экономически эффективные радиолокационные системы для обнаружения неподвижных или медленно движущихся целей.	Упрощает настройку оборудования и снижает затраты, хотя и снижает гибкость.
Цифровое формирование луча	Для современных радиолокационных приложений требуется точное управление лучом для поражения нескольких целей.	Позволяет одновременно формировать несколько пучков и осуществлять высокоточное обнаружение целей.
Гибридное формирование луча	Применение миллиметровых радаров, в частности, в технологиях 5G.	Сочетает аналоговые и цифровые технологии для оптимизации производительности и снижения сложности системы.

В адаптивном режиме фазы элементов решетки пересчитываются прямо в процессе – подстраиваясь под цель и различные помехи. Аналоговые схемы тут проигрывают в маневренности, но они экономнее по электричеству. Цифровой подход (ЦФЛ) уже позволяет делать несколько лучей одновременно, и разрешение лучше, и шумы меньше достают. Гибрид – он как золотая середина: и расходы сокращает, и выхлоп дает хороший, особенно на высоких частотах (типа 5G). Но когда речь заходит о ЧМ и MIMO, возникают проблемы – усиление луча нужно держать высокое, а это уже требует цифровых методов, что-то типа PCA или РНИЧМ. На практике от этого уходят так: комбинируют гибридные алгоритмы с методами пространственного поиска. Так и локализация источников в режиме временного разделения становится точнее, и вычислений меньше, и общая надежность растет.

Применение технологии интеграции MIMO и формирования луча при обнаружении БПЛА с низкой ЭПР

Выше мы рассматривали каждый аспект отдельно: и MIMO, и управление лучом, и сложности с обнаружением маленьких беспилотников. Теперь следующий шаг – посмотреть, как все эти составляющие скрещиваются в едином алгоритме. На

рис. 1 это как раз и показано – как все эти передовые решения интегрируются в итоговую схему.

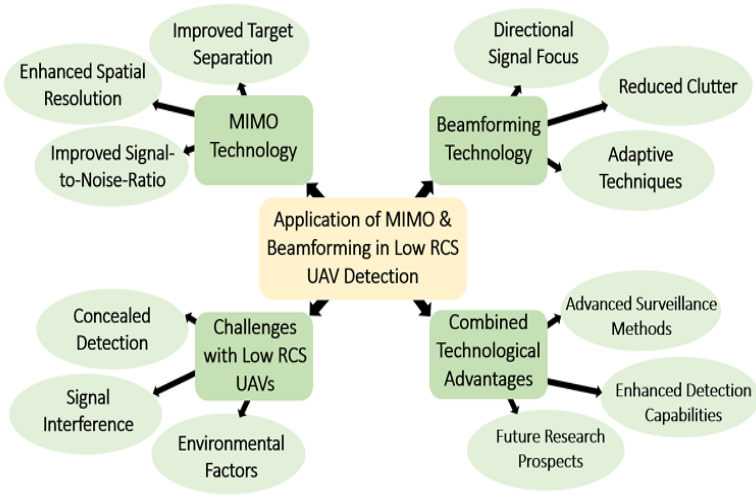


Рис. 1. Визуализация связей MIMO и формирования луча в обнаружении БПЛА

Рис. 1 показывает, как две платформы работают в связке. MIMO – это основа: он поднимает разрешение и энергетику канала, что позволяет вытягивать слабый сигнал от малозаметной цели из шума. Дополнительно на это накладывается формирование луча – оно, по сути, как фильтр, который собирает энергию туда, куда надо, и гасит боковые наводки. Еще и адаптивная коррекция антенн в реальном времени – чтобы система не зависала при смене ракурса или внешних условий. На выходе получается не просто детектор, а гибкий измерительный комплекс, который сам адаптируется под обстановку.

Но не все так гладко – правая часть схемы показывает сохраняющиеся проблемы: малая отражающая способность целей, засветка от местных предметов, погодные эффекты. Тем не менее, именно совместное использование этих методов позволяет если не полностью устранить эти помехи, то хотя бы заметно ослабить. А это уже серьезный шаг к созданию систем наблюдения нового поколения. Общий тренд очевиден: гибкость и адаптивность становятся главными требованиями к современной радиолокационной аппаратуре.

Обратимся к экспериментальным данным. В [5] авторы на практике проверили связку MIMO и цифрового формирования на макете 2×2 с программным управлением – установка показала уверенное выделение тихоходных целей с низким ЭПР на фоне отражений от земли, а также улучшила угловое разделение объектов. В работе [6] для тех же целей применен миллиметровый радар с MUSIC-обработкой, что позволило восстановить трехмерную картину движения дрона по микродоплеровским признакам. Близкие результаты приведены в [8], однако здесь дополнительно проработана тема повышения частоты обновления данных для борьбы с групповыми угрозами. Что касается практических воплощений, то в [7] описана система, где ЦФЛ и MIMO совместно решают задачу локации малоподвижных целей, а в [9] предложен комплекс на базе РНИЧМ MIMO с цифровой обработкой, ориентированный на предотвращение столкновений в плотных группах дронов.

Заключение

В статье делается обзор двух ключевых подходов – MIMO и управления лучом – применительно к поиску беспилотников. Если пробежаться по свежим публикациям, складывается отчетливая картина: MIMO выигрывает за счет разрешения по пространству, а формирование луча – за счет того, что сигнал можно направить точно куда надо. Вместе они дают гораздо больше, чем классические радары по отдельности.

У MIMO, конечно, свои козыри – разнесение каналов и мультиплексирование неплохо помогают и с разрешением, и с распознаванием, особенно когда цель малозаметная и требует высокой детализации. Но есть и обратная сторона: схема сложная в реализации, да и к помехам чувствительная, так что без доводок не обойтись. С формированием луча ситуация иная – оно хорошо там, где нужна фокусировка и подавление боковых наводок, в сложной обстановке это серьезно повышает соотношение сигнал/шум. Правда, в динамике оно начинает «тормозить»: фиксированные схемы не успевают за перемещением цели, и точное сопровождение требует постоянного удержания луча.

Похоже, самый оптимальный путь – не выбирать что-то одно, а пробовать объединять оба метода, чтобы скомпенсировать слабости каждого. И если к этому добавить элементы искусственного интеллекта, можно получить действительно гибкую систему, которая способна переломить ситуацию в борьбе с малозаметными дроновыми угрозами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donnet, B.; Longstaff, I. MIMO radar, techniques and opportunities. In Proceedings of the Proceedings of the 2006 European Radar Conference, Manchester, UK, 13–15 September 2006; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2006; pp. 112–115.

2. Brookner, E. MIMO versus conventional radar performance against jammers. In Proceedings of the 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, USA, 8–12 May 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 0703–0708.

3. Instruments, T. MIMO Radar. 2018. Available online: https://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf?ts=1702490011052& ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F .

4. Hassanien, A.; Vorobyov, S. Phased-MIMO radar: A tradeoff between phased-array and MIMO radars. IEEE Trans. Signal Process. 2010, 58, 3137–3151.

5. Al-Nuaim, T.; Alam, M.; Aldowesh, A. Low-cost implementation of a multiple-input multiple-output radar prototype for drone detection. In Proceedings of the 2019 International Symposium ELMAR, Zadar, Croatia, 23–25 September 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 183–186.

6. Paredes, J.A.; Álvarez, F.J.; Hansard, M.; Rajab, K.Z. A Gaussian Process model for UAV localization using millimetre wave radar. Expert Syst. Appl. 2021, 185, 115563.

7. Nie, W.; Han, Z.C.; Li, Y.; He, W.; Xie, L.B.; Yang, X.L.; Zhou, M. UAV detection and localization based on multi-dimensional signal features. IEEE Sens. J. 2021, 22, 5150–5162.

8. Khawaja, W.A.G. A Survey on Radar Techniques for Detection, Tracking, and Classification of Aerial Threats. Authorea Prepr. 2023.

9. Tierney, B.B.; States, N.R.L.W.D.W.U. 3D MIMO Radar Prototype for UAV Swarming, Tracking, and Collision Avoidance: Karle Fellowship Final Report; Naval Research Lab: Washington, DC, USA, 2019.

© И. Д. Гельбутовский, Л. В. Шебалкова, 2026

УДК 67.05
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-187-194

С. К. Мялкин[1]✉

Об оптимизации результатов 3D печати по технологии mSLA

[1]АО «Научно-исследовательский институт электронных приборов»,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: smyalkin00@gmail.com

Аннотация. В современных реалиях прототипирование посредством трехмерной печати является все более востребованным в самых разных областях: медицине, машиностроении, архитектуре, космической отросли. Уже сейчас для 3D принтеров существует множество задач, и для выполнения каждой есть наиболее подходящая технология печати и материал: пластики, композитные материалы, металлы, керамические материалы и фотополимерные смолы. Одной из таких технологий является mSLA (англ. masked stereolithography) печать, материалом для которой служат фотополимерные смолы. Смолы для печати не являются эталонами по прочности, эластичности или долговечности, однако для основной задачи, а именно, как можно более точного и детализированного прототипирования, например, в области протезирования, подходят как нельзя лучше. В данной работе представлены сравнительный анализ факторов, влияющих на результат 3D mSLA печати, и возможные пути оптимизации результата.

Ключевые слова: 3D печать, mSLA, УФ-волна

S. K. Myalkin[1]✉

About optimizing the results of mSLA technology 3D printing

[1]JSC «Scientific Research Institute of Electronic Devices», Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: smyalkin00@gmail.com

Abstract. In today`s reality, prototyping through three-dimensional printing is becoming increasingly popular in various fields: medicine, engineering, architecture, space industry. There are already numerous applications for 3D printers, and each one requires a specific printing technology and material: plastics, composite materials, metals, ceramic materials and photopolymer resins. One such technology is mSLA (masked stereolithography) printing, which utilizes photopolymer resins as printing material. Printing resins are not best standards of strength, elasticity or durability, however, for main task, namely as accurate and detailed prototyping as possible, for example in the field of prosthetics, better than anything else. This work presents an analysis of the factors affecting result of 3D mSLA printing and possible ways to optimize results.

Keywords: 3D print, mSLA, UV-wave

Введение

Отличительной особенностью печатаемых фотополимером изделий по технологиям mSLA, SLA (англ. stereolithography), DLP (англ. digital light processing) и TPP (англ. two photon polymerization) является возможность печати изделий, поверхность которых задана сложными кривыми, с сохранением детализации и гладкости поверхности даже при значительном масштабировании по осям *XYZ*.

Благодаря этому становится возможным достаточно точно сохранять геометрические особенности, заложенные для изделия на этапе моделирования.

В общем виде на качество печати влияют три фактора: фотополимерная смола; 3D принтер; файлы для 3D печати. Соответственно, для получения оптимального результата печати необходимо в соответствии с требованиями к печатаемому изделию грамотно подобрать эти три составляющие.

Результаты

Фотополимерная смола: для технологий mSLA, SLA и DLP подходят, по сути, одни и те же смолы. Они представляют собой смесь, кристаллизация которой происходит под воздействием УФ-волн. Наиболее распространенными в данный момент являются смолы, предназначенные для засветки излучением с длиной волны 405 нм с учетом небольшой погрешности качества самих смол и качества источников засветки принтеров, однако существуют также смолы, затвердевание которых возможно в диапазоне УФ-волн 365-405 нм [1,2]. Свойства смолы, в том числе максимально возможное качество печатаемого изделия, определяются пропорциями компонентов в ее составе: фотоинициаторы (запускают процесс затвердевания при облучении ультрафиолетом); мономеры (определяют вязкость жидкой смолы); олигомеры (определяют жесткость); красящие пигменты.

Большинство современных принтеров с технологией mSLA имеют среднюю рабочую длину волны 405 нм, выбор смол для которой довольно обширен. Фотополимерные смолы, рассчитанные на такую длину УФ-волны, подразделяются по типу очистителя при постобработке на спиртосмываемую и водосмываемую. К достоинствам первой можно отнести чуть большую точность, к недостаткам относительно токсичный изопропиловый или этиловый спирты. Кроме того, при очистке необходимо быть осторожными, поскольку при длительном воздействии спирт может повредить недозасвеченный внешний слой изделия. Вторая группа смол имеет чуть меньшую точность, хотя на практике человеческий глаз едва ли способен обнаружить разницу со спиртосмываемой, при этом менее токсична и смывается обычной водой. Стоит, однако, заметить две особенности постобработки водосмываемой смолы: длительное пребывание в воде из-за неполной полимеризации при печати может привести к деформации/искажению формы в случае наличия у изделия плоских поверхностей с большой площадью; после снятия поддержек (в случае наличия таковых) и промывки перед дозасветкой необходимо тщательно, желательно мягкой кистью (во избежание царапин), очистить расшивку изделия от остатков воды/смеси воды и даже небольшого количества смолы, так как из-за возможного хлорирования водопроводной воды смесь кристаллизуется и приобретет форму белого налета. Также для обеих групп смол стоит уточнить, что спирт и вода предназначены исключительно для очистки, попытка разбавления жидкой смолы приведет к нарушению структуры и проблемам с отверждением.

Наиболее важной характеристикой фотополимерной смолы, напрямую влияющей на результат печати, является ее вязкость. Более вязкая консистенция из-за большего времени растекания требует увеличения времени ретракта (цикла

подъем-возврат печатной платформы), из-за чего увеличивается общее время печати. Большое время экспозиции может привести к паразитной засветке и потере мелких деталей. Кроме того, излишняя экспозиция может не только ухудшать детализацию, но и вызвать прилипание к пленке резервуара со смолой с последующим отрывом от печатной платформы и привести к снижению эластичности, в результате чего и без того хрупкая смола станет слишком уязвимой к любым механическим воздействиям (результат – трещины и сколы). Сочетание высокой вязкости и времени экспозиции может также способствовать так называемому эффекту слоновьей ноги, при котором часть печатаемого изделия, контактирующая с платформой, окажется деформирована расширением.

Таким образом, если исходить из первостепенной задачи обеспечения высокого качества и прочности, а также оптимизации самого процесса печати, как для спиртосмываемой, так и водосмываемой смол наилучшим решением будет использование смолы низкой вязкости или самостоятельное снижение вязкости смолы и выставление минимального времени экспозиции, достаточного для отверждения смолы.

Опытным путем было выявлено несколько способов снижения вязкости смолы.

Первым способом является разбавление другой смолой на той же основе, но имеющей меньшую вязкость. Данный способ является самым ненадежным, поскольку смешивание смол, отличающихся по свойствам даже внутри соседних производственных партий, может привести к значительному изменению качества, настроек печати или химической несовместимости.

Вторым способом является фильтрация смолы от красящих пигментов. Большинство производителей смол используют пигменты для придания смоле того или иного цвета, поскольку без красителей она является прозрачной или, чаще всего, полупрозрачной с желтоватым оттенком (в случае низкого качества). Поскольку пигмент нередко имеет большую плотность, чем смола, при отсутствии регулярного перемешивания он оседает. Например, из нескольких протестированных смол от Anycubic, такому эффекту наиболее явно подвержена смола Water-Wash Resin HD gray – пигмент, обеспечивающий темный оттенок серого, оседает уже спустя пару часов. В случае такого естественного отделения пигмента, вызванного плохой корреляцией размеров частиц пигмента и его плотности с основным составом, можно уменьшить вязкость просто пропустив смолу через мелкодисперсный фильтр.

Третий и наиболее действенный способ, универсальный для спиртосмываемых и водосмываемых фотополимерных смол, основан на знании уравнения коэффициента вязкости жидкости Френкеля-Андраде:

$$\eta = Ae^{w/kT} \tag{1}$$

где: A – коэффициент вязкого течения; w – энергия активации вязкого течения; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Из уравнения (1) следует, что увеличение температуры *T* приводит к уменьшению коэффициента вязкости жидкости η, в данном случае смолы. Экспериментально было установлено, что оптимальным является нагрев смолы непосредственно перед печатью приблизительно до 40°C, после чего в процессе печати происходит естественное охлаждение до рабочих температур (зависит от принтера, обычно соответствует 30-35°C). Целесообразно делать переход именно к охлаждению в процессе печати, поскольку нагрев во время печати может привести к расслоению. Проще и безопаснее всего нагреть смолу, поместив емкость в горячую воду. Проверено на водосмываемых смолах Anycubic Water-Wash Resin +/2.0 Gray и Elegoo Water Washable Ceramic Grey, а также спиртосмываемой Anycubic Standard Resin Beige.

Параметры времени экспозиции часто рекомендуются самим производителем для разных принтеров и толщины слоя. Однако на практике необходимо учитывать не проектные параметры принтера и смолы, а актуальные в каждом отдельном случае, поскольку производство и хранение оказывают влияние на наличие небольших отклонений от нормы. Поэтому поиск минимального времени экспозиции, достаточного для отверждения смолы, необходимо осуществлять самостоятельно с учетом состояния самой смолы, практической интенсивности источника засветки (поскольку им свойственна деградация), типа пленки (ACF, FEP, PFA) и степени ее износа, скорости подъема печатной платформы и так далее. На практике в современных принтерах основные слои с толщиной 0,01-0,05 мм имеют время экспозиции 1,5-2,5 с, переходные 8-12 с, для базовых слоев желательно устанавливать время засветки 20-25 с, чтобы избежать отрыва от печатной платформы.

3D принтер: технология 3D печати mSLA основывается на отверждении фотополимерной смолы в результате воздействия УФ-лучей, испускаемых источником принтера и проходящих через специальный ЖК-дисплей. Факторами, непосредственно влияющими на обеспечение высокого качества и прочности на уровне принтера, являются ЖК-дисплей, источник света, конструктивные особенности и корректность калибровки.

Жидкокристаллический дисплей, как следуют из названия, основан на технологии жидких кристаллов, образующих его матрицу. Главное свойство кристаллов заключается в способности при воздействии тока менять ориентацию и, соответственно, блокировать свет, в данном случае УФ-волны. Таким образом, ЖК-дисплей при воздействии тока образует своеобразную маску в тех местах произвольного слоя печатаемого изделия, которые не требуется отверждать. Жидкокристаллические дисплеи, используемые в 3D принтерах, подразделяются на монохромные и RGB (англ. red green blue). Визуально монохромные имеют лишь два состояния пикселей – «транспарентное» и «темное». RGB благодаря наличию цветных фильтров обеспечивают получение широкой палитры цветов и их оттенков. Поскольку единственной задачей дисплея при mSLA печати является точечная фильтрация ультрафиолета, наличие широкой палитры цветов, обеспечиваемых RGB, не обязательно. Монохромные дисплеи более долговечны, имеют меньшее энергопотребление, большую четкость и значительно

дешевле, поэтому целесообразно их использование. Стоит также заметить, что из-за ограниченного ресурса дисплеи являются расходным материалом, поэтому при поточной печати и повышенной скорости выработки ресурса преимущества монохромных дисплеев в долговечности и дешевизне особенно важны. Применительно к 3D печати, монохромные ЖК-дисплеи имеют две важные характеристики – разрешение и размер пикселя. Под разрешением понимается количество пикселей (точек) вдоль *X* и *Y* сторон дисплея. Чем больше пикселей имеет матрица дисплея фиксированного размера, тем меньше размер по *XY* произвольного пикселя в ней. Чем меньше размер пикселя, тем более точной является фильтрация ультрафиолета и, следовательно, более четкой и детализированной получается поверхность печатаемого изделия.

В большинстве 3D принтеров, работающих по технологии mSLA, используются два типа источника УФ-волн: матричные ParaLED-массивы с SMD светодиодами или COB (англ. Chip-on-Board). Основным параметром, вокруг которого в основном сосредоточено соперничество данных технологий засветки, является коэффициент равномерности освещения (КРО) (англ. light uniformity):

$$U_0 = \frac{E_{\text{мин}}}{E_{\text{макс}}} \tag{2}$$

где: $E_{\text{мин}}$ – минимальная освещенность; $E_{\text{макс}}$ – максимальная освещенность.

Величина КРО (2) напрямую влияет на качество печатаемого изделия, так как в случае большой разницы в освещенности на разных участках области печати при фиксированных параметрах экспозиции для всей области возникает нарушение геометрии и детализации. Например, если в центре освещение значительно интенсивнее, чем по краям (излучаемый светодиодом свет имеет коническую диаграмму направленности, и на некотором удалении интенсивность излучения в центре больше, чем по краю), для крупных изделий, границы которых находятся в области менее интенсивного освещения, центральная часть будет затвердевать полностью, а по краям, из-за недостаточной засветки, лишь частично, из-за чего будет теряться детализация и, с учетом постоянной нагрузки на растяжение при отрыве, будет возможно появление расслоения или физическая деформация. Из двух упомянутых технологий ParaLED имеет меньшие проблемы с равномерностью освещения за счет матричной конструкции с ячейками из SMD светодиодов и малоразмерных линз, распределенными равномерно под всей площадью ЖК-экрана. Заявленный КРО таких принтеров обычно составляет 0,92-0,95 [3,4]. Представителями ParaLED, например, являются Elegoo Saturn и Mars 1 поколения. Однако ParaLED технология имеет несколько существенных недостатков, таких как плохой теплоотвод и большое энергопотребление, в результате чего ресурс как SMD светодиодов, так и линз, сильно ограничен. Системы засветки COB (англ. Chip-on-Board) также представляют из себя матрицу, однако в ней полупроводниковые кристаллы не имеют собственных корпусов, расположены плотно друг к другу и имеют одну общую крупноразмерную линзу, расположенную на некотором расстоянии. За счет такого размещения становится возможно использование большего числа светодиодов, уменьшение мощности

и значительное уменьшение размеров матрицы. Поскольку размер матрицы сильно меньше, чем у ParaLED, и линза расположена не вплотную, значительно улучшается естественный теплоотвод. Поэтому ресурс таких систем намного больше, а энергопотребление меньше. Однако из-за чрезмерно большого отношения площади ЖК-экрана к площади матрицы светодиодов возникает проблема с ощутимой неравномерностью освещения, поскольку защитная линза обеспечивает лишь частичную коллимацию. Поэтому для 3D принтеров с COB целесообразным является использование дополнительной коллиматорной линзы, размещаемой между экраном и линзой COB. Так как пространство внутри принтера ограничено, а выпуклые сферические и асферические линзы не очень компактны, оптимальным решением для преобразования рассеянного света в параллельный пучок является использование линзы Френеля. Представителями структуры с COB являются почти все современные mSLA принтеры (например, Elegoo Mars поколений 2-4). Они имеют сравнимый с ParaLED КРО [3,4]. Обобщенная структура ParaLED принтера показана на рис. 1, а COB – на рис. 2.

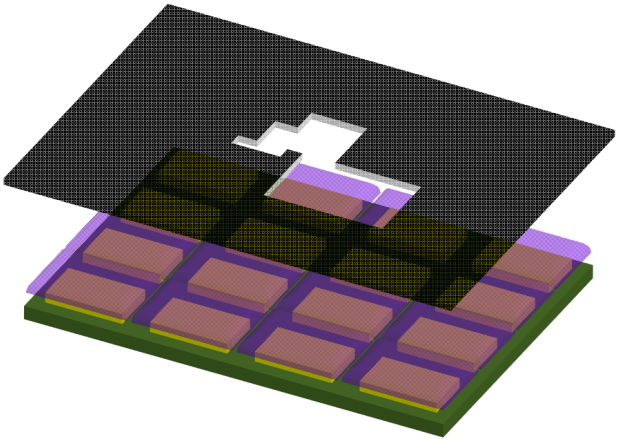


Рис. 1. Обобщенная структура ParaLED mSLA 3D принтера

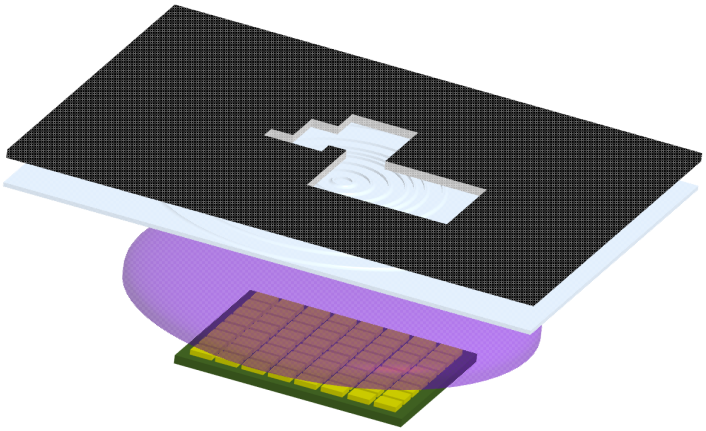


Рис. 2. Обобщенная структура COB mSLA 3D принтера

Обе технологии обеспечивают примерно одинаковое качество экспозиции, однако предпочтение отдается более простому, дешевому и долговечному COB.

Печатная платформа, оптический концевой датчик (датчик нуля), шаговый двигатель, ходовой винт, направляющие рельсы – качество исполнения и параметры этих компонентов также влияют на результат печати. Непосредственно перед печатью необходимо проводить калибровку. Калибровка заключается в опускании платформы с ослабленными креплениями до уровня защитной пленки резервуара для смолы, обозначения данного уровня как нулевого в системе координат, выравнивания стола печатной платформы таким образом, чтобы он был параллелен ЖК-экрану, и фиксация. Калибровку на практике можно проводить как с пустым резервуаром, так и без него, используя листы бумаги, имитирующие уровень пленки резервуара. Частота калибровки зависит от конструкции платформы: например, если стол крепится к печатной платформе при помощи шарового шарнира и двух точек крепления, как, например, у принтеров Elegoo Mars поколений 1-4, калибровку желательно проводить перед каждой печатью из-за возможного нарушения позиционирования стола в результате снятия с него напечатанных изделий; если в конструкции стола отсутствует шарнир, и фиксация осуществляется в четырех (или более) точках, как например у Elegoo Mars 4 Ultra/Mars 5 семейств принтеров Anycubic Photon mono/m или Phrozen Sonic Mini, калибровку можно проводить намного реже. Так, на практике при работе с Elegoo Mars 3 приходилось калибровать стол перед каждой печатью, тогда как для Elegoo Mars 4 Ultra за все циклы печати потребовался лишь раз.

Результат 3D печати зависит не только от созданной в САПР модели. Подготовка модели к печати осуществляется в специальных программах, называемых слайсерами (англ. Slicer). Наиболее популярными универсальными слайсерами для фотополимерной печати являются ChituBox и Lychee, но некоторые компании-производители принтеров имеют и собственные слайсеры: Anycubic Photon Workshop, Elegoo SatelLite 3D, Phrozen DS Slicer и так далее. Слайсер необходим главным образом для послойной нарезки модели, экспортированной из исходной САПР в универсальный формат STL или OBJ, с заданной высотой слоя, и создания G-кода («инструкции» для принтера). Также в слайсере можно вручную или автоматически расставлять поддержки, выбирать тип заполнения модели и настроить сглаживание внешнего слоя. После преобразования модель представляется в форме совокупности вокселей (объемных пикселей), стороны каждого из которых соответствуют *XY* размерам пикселя матрицы ЖК-дисплея и выбранной высоте слоя *Z*. Корректность нарезки можно проверить вручную по слоям.

Большинство принтеров поддерживают USB и Wi-Fi передачу файлов. При использовании USB-флэш накопителя, после записи следует сверить размеры оригинального и записанных на носитель и принтер файлов. Если в процессе переноса файлов возникли несоответствия, следует провести дополнительные тесты носителя – для флэш накопителей, особенно нижнего ценового сегмента, свойственен быстрый износ при перезаписи. Если ошибки обнаруживаются и в

дальнейшем, следует сменить носитель, так как потеря данных влечет ошибки при печати.

Заключение

Для достижения оптимального результата mSLA печати требуется учитывать множество параметров, которыми обладают фотополимерная смола, 3D принтер и файлы для 3D печати. Подбор смолы, выбор принтера с теми или иными характеристиками и особенности 3D модели и подготовка ее к печати – все это также зависит от того, что понимается под оптимальным результатом: максимальная детализация, минимальная постобработка, повышенная прочность, скорость печати или компромисс между ними.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aura3d guide 385nm vs 405nm in resin 3d printing [Электронный ресурс]. – URL: https://aura3dofficial.com/blog/f/aura3d-guide-385nm-vs-405nm-in-resin-3d-printing (дата обращения: 03.04.2026).

2. UV LED Curing Wavelength Guide: 365nm, 385nm, 395nm, 405nm [Электронный ресурс]. – URL: https://www.uvndt.com/uv-led-curing-wavelights (дата обращения: 03.04.2026).

3. Budget SLA Printer Guide: Features That Really Matter [Электронный ресурс]. – URL: https://blog.magforms.com/budget-sla-printer-guide-features-that-really-matter (дата обращения: 07.04.2026).

4. LCD 3D Printers [Электронный ресурс]. – URL: https://us.elegoo.com/collections/lcd-printers (дата обращения: 07.04.2026).

© С. К. Мялкин, 2026

УДК 623.468.082.6
DOI 10.33764/2618-981X-2026-8-1-195-200

А. В. Мищенко[1], Е. В. Проскуряков[1]✉, М. В. Сорокин[1], А. П. Исаков[2]

Кумулятивный заряд с двухслойной облицовкой

[1]Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище,
г. Новосибирск, Российская Федерация
[2]Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: saper67@mail.ru

Аннотация. Рассматривается увеличение эффективности штатного кумулятивного элемента калибром 42 мм за счет повышения его зажигательного действия. Указанная цель достигается применением зажигательного состава для изготовления наружных слоев облицовки кумулятивного заряда. При схлопывании такой облицовки происходит разогрев материала облицовки кумулятивного заряда и последующее горение песта из зажигательного состава. Пест проникает в пробоину и зажигает запреградные объекты.

Ключевые слова: запреградное действие, кумулятивная струя, кумулятивный заряд, кумулятивный элемент, облицовка кумулятивного заряда

A. V. Mischenko[1], E. V. Proskuryakov[1]✉, M. V. Sorokin[1], A. P. Isakov[2]

Shaped charge with double-layer lining

[1]Novosibirsk Higher Military Command School of the Order of Zhukov,
Novosibirsk, Russian Federation
[2]Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: saper67@mail.ru

Abstract. The purpose of the invention is to increase the effectiveness of a standard 42 mm shaped charge by enhancing its incendiary effect. This goal is achieved by using an incendiary composition to create the outer layers of the shaped charge's casing. When the casing collapses, it heats up the material of the shaped charge's casing, leading to the subsequent combustion of the incendiary composition. The combustion products penetrate the breach and ignite the surrounding objects.

Keywords: retrograde action, shaped jet, shaped charge, shaped element, shaped charge lining

Введение

Данная работа относится к военной технике, в частности к кумулятивным боеприпасам (БП) малого калибра, например, к кумулятивным элементам (КЭ) калибром 42 мм для кассетных БП [1]. Разовая бомбовая кассета РБК-500У ПТАБ-1М содержит 248 шт. КЭ ПТАБ-1М (рис. 1).

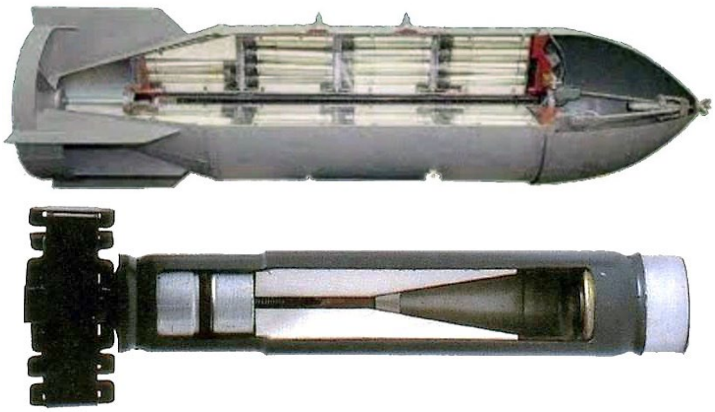


Рис. 1. Разовая бомбовая кассета РБК-500У ПТАБ-1М (вверху), кассетный КЭ ПТАБ-1М калибром 42 мм (внизу)

В штатном КЭ используется медная облицовка с углом раствора около 30 градусов. В результате схлопывания металлической облицовки кумулятивного заряда (КЗ) формируются тонкая скоростная кумулятивная струя (КС) и компактный пест (рис. 2).



Рис. 2. Пест из медной облицовки

Скорость головной части КС достигает 10 км/с, а хвостовые части КС имеют скорость песта и движутся сравнительно медленно со скоростью около 1 км/с. КС пробивает преграду, а пест, летящий за КС, преграду затыкает и торчит из преграды в виде характерного «хвостика» (рис. 3).

Глубина пробития КЗ составляет около 200 мм (5 калибров), выходное отверстие в преграде невелико (не более 10 мм). Запреградное действие КЗ связано с осколочным потоком из преграды, который оценивается диаметром выходного отверстия. Кумулятивное, фугасное и зажигательное действие зарядов КЭ недостаточно для поражения типовых запреградных объектов.



Рис. 3. Отверстия, пробитые кумулятивной струей в преграде: слева – входные отверстия; справа – выходные отверстия

Методы и материалы

Известен ряд технических решений, направленных на повышение запреградного действия КЗ:

КЗ с биметаллической облицовкой, внутренний слой которой изготовлен из порошкового псевдосплава вольфрам – медь, а наружный слой из порошка меди или железа с добавлением графита и легкоплавкого металла [2];

КЗ с использованием в облицовке различных соединений (оксида ртути, оксидов неметаллов, перманганатов металлов, серы, фосфора и пр.) [3].

К недостаткам технического решения [2] можно отнести пониженную эффективность пробивного действия, так как металлы, входящие в состав облицовки, способны реагировать еще на стадии образования КС, не обладают направленным действием и достаточным как пробивным, так и запреградным действием. Техническое решение [3] направлено на увеличение выхода материала облицовки в КС за счет уменьшения массы песта и способствует увеличению глубины пробития преград. В то же время в нем не реализованы подходы к повышению запреградного действия.

КЗ применяются также при добыче нефти (перфораторы скважин). Угол раствора конической выемки типового перфоратора составляет 50-60 градусов. Облицовка перфоратора изготовлена из прессованного медного порошка. Пористый материал облицовки при обжатии разогревается, и пест рассыпается [4-5].

Целью данной работы является увеличение эффективности штатного КЭ калибром 42 мм за счет повышения его зажигательного действия. Указанная цель достигается применением зажигательного состава для изготовления наружных слоев облицовки КЗ. При схлопывании такой облицовки происходит разогрев материала облицовки КЗ и последующее горение песта из зажигательного

состава. Пест проникает в пробоину и зажигает запреградные объекты. КС образуется из внутренних слоев облицовки, а пест из ее наружных слоев [6].

Пусть имеется типовой КЗ с медной облицовкой, толщина облицовки R. С помощью гидродинамической модели кумуляции рассчитаем толщину R_C внутреннего слоя облицовки, который уходит в КС. Схема струеобразования в системе отсчета, где точка контакта облицовки K неподвижна, показана на рис. 4.

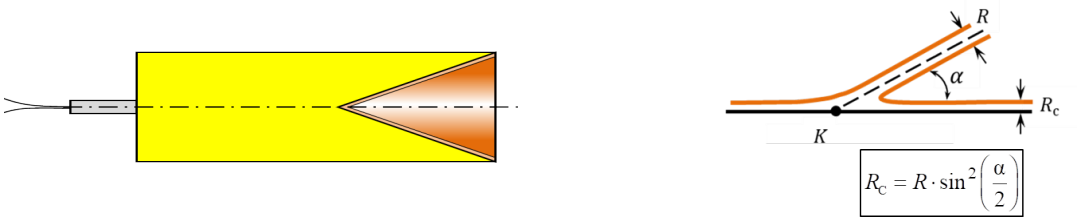


Рис. 4. КЗ и схема образования струи в системе, где точка K неподвижна:
K – точка контакта облицовки; R – исходная толщина облицовки; R_C – радиус струи; α – угол между облицовкой и жесткой стенкой

Далее используются следующие обозначения:
V – скорость натекания облицовки на точку K;
$R_П$ – толщина песта;
α – угол между облицовкой и жесткой стенкой;
ρ – плотность материала облицовки;
$V_П$ – скорость песта;
F – расстояние от КЗ до преграды.
Рассмотрим расчетные формулы для определения размера струи.
Закон сохранения массы:

$$\rho \cdot V \cdot R = \rho \cdot V \cdot R_C + \rho \cdot V \cdot R_П,$$
$$R = R_C + R_П. \qquad (1)$$

Закон сохранения импульса:

$$\rho \cdot V \cdot R \cdot V \cdot \cos\alpha = \rho \cdot V \cdot R_П \cdot V - \rho \cdot V \cdot R_C \cdot V,$$
$$R \cdot \cos\alpha = R_П - R_C;$$
$$\begin{cases} R = R_C + R_П \cdot \cos\alpha; & R_C = R \cdot \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ R_П - R_C = R \cdot \cos\alpha; & \frac{R_C}{R} = \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \end{cases}. \qquad (2)$$

Если угол 2α раствора облицовки КЗ равен 60°, то $\frac{R_C}{R} = 0{,}1$.

Радиус струи R_C составляет около 10% толщины R облицовки КЗ.

Двухслойная облицовка КЗ (рис. 5) состоит из внутреннего медного слоя для образования КС.

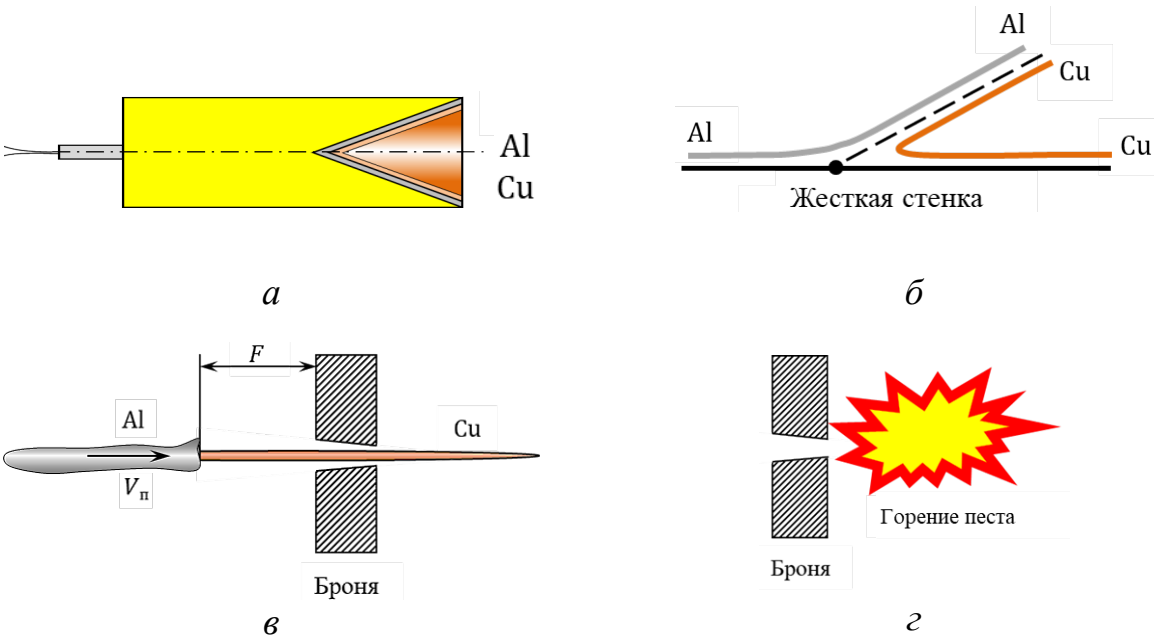


Рис. 5. Кумулятивный заряд с двухслойной Al – Cu облицовкой:
а – исходный КЗ; *б* – разделение облицовки КЗ на КС и пест; *в* – проникание КС в броню; *г* – пест проникает за броню и сгорает

Пест образуется из наружного зажигательного слоя, который прессуется из порошка на основе зажигательного состава (например, Zr) или термитного состава (например, Al, Mg) в смеси с окислителем (табл. 1).

Таблица 1. Горючее для пиротехнических составов

Свойства / Горючее	Температура воспламенения, °С	Энергия горения, кДж/г	Плотность, г/см^3	Формула оксида
Алюминий Al	800	31,1	2,7	Al_2O_3
Магний Mg	550	24,8	1,7	MgO
Цирконий Zr	200	12,2	6,5	ZrO

Такой состав горит без доступа воздуха. Время T горения песта зависит от дисперсности порошка. Необходимо, чтобы за преградой оказался горящий пест $\left(T > \frac{F}{V_п}\right)$. Пест типовых КЗ движется со скоростью $V_П = 1$ км/с, фокусное расстояние заряда F обычно составляет калибр КЗ. В случае кассетного кумулятивного элемента калибром 42 мм необходимое время горения песта составляет около 50 мкс.

Результаты

В данной работе представлено техническое решение по увеличению эффективности штатного КЭ калибром 42 мм за счет повышения его зажигательного

действия. Наружные слои облицовки (80-90% от штатной толщины) изготовлены из зажигательного состава (при замене должен выполняться принцип эквивалентности толщин по массе). Внутренние слои облицовки (10-20% от штатной ее толщины) изготовлены из медной фольги. При схлопывании такой облицовки происходит разогрев материала облицовки КЗ и последующее горение песта из зажигательного состава. Пест проникает в пробоину и зажигает запреградные объекты.

Обсуждение

Потенциальные вопросы для проработки:

1) совместимость слоев: адгезия между медью и зажигательным составом должна быть достаточной, чтобы слои не расслаивались при хранении и транспортировке;

2) влияние на баллистику: возможное влияние изменения плотности облицовки на характеристики КС – требуется экспериментальная проверка бронепробиваемости.

Заключение

В качестве основных преимуществ технического решения можно выделить:

1) комбинированное действие: КС обеспечивает пробитие брони, зажигательный пест создает вторичный поражающий фактор – возгорание в запреградном пространстве;

2) сохранение бронепробиваемости: доля медной фольги достаточна для формирования эффективной КС, принцип эквивалентности масс при замене материала помогает сохранить расчетную массу облицовки и, следовательно, параметры струи;

3) простота модернизации: решение не требует кардинальной переделки конструкции КЭ, меняется только состав и структура облицовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век. Научно-техническое издание. Т. XII: Боеприпасы и средства поражения. М., 2006.

2. Патент РФ № 2151362, МПК F42B1/032, F42B1/036. Кумулятивный заряд с биметаллической облицовкой и способ ее изготовления / Смеликов В.Г., Базилевич В.М., Воропаев И.Г., Карабанов А.П.; заявл. 23.04.1999; опубл. 20.06.2000, Бюл. № 26.

3. Патент РФ № 2461791C1, МПК F42B1/24. Кумулятивный заряд Староверова – 8 (варианты) / Староверов Н.Е.; заявл. 12.01.2011; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.

4. Вицени Е.М. Кумулятивные перфораторы, применяемые в нефтяных и газовых скважинах. – М.: Недра, 1971.

5. Пути создания и совершенствования кумулятивных зарядов с беспестовыми облицовками / Т.Е. Волдаева, В.В. Иваненко и др. // Прострелочно-взрывные и импульсные виды работ в скважинах: Сб. научных трудов. – М.: ВИЭМС, 1991.

6. М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат, Проблемы гидродинамики и их математические модели, «Наука», 1973.

© А. В. Мищенко, Е. В. Проскуряков, М. В. Сорокин, А. П. Исаков, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. Л. В. Шастин. Перспективы использования фемтосекундных лазерных линий в атмосферных линиях телекоммуникаций и мониторинга 3
2. А. Г. Седухин, М. С. Колташова. Оптические системы на основе аксиконных и линзовых элементов и улучшение их характеристик при формировании перестраиваемых кольцевых лазерных пучков 7
3. В. Е. Зайцева, В. П. Корольков. О возможности создания многослойных дифракционных аттенюаторов 14
4. С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев. Паттерн структурированного света работает как голограмма 20
5. В. И. Наливайко. Структура и пространственное разрешение халькогенидных резистов состава As_2S_3 27
6. Ю. Ц. Батомункуев. Ахроматизация внеосевого голограммного оптического элемента 34
7. Ю. Ц. Батомункуев, В. И. Жуков, Д. А. Швецов. Определение размеров пузырей в жидкости Novec 649 37
8. А. А. Лузанов, И. А. Коняхин. Многоканальная оптико-электронная система измерения деформаций кораблестроительного дока 42
9. А. А. Сырбаков, А. А. Дзюба, С. В. Додонов, И. А. Зарубин. Применение эшелле-спектрометра для сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа 50
10. А. Л. Пазоев. Увеличение производительности алгоритма вычисления интегральных преобразований методом ограничения многомерного пространства допустимых решений 57
11. А. М. Оборин, К. С. Зубанов, С. В. Двойнишников. Разработка программного модуля для обработки сигналов лазерных доплеровских анемометров 66
12. А. Ю. Кравцова, А. В. Трубин, Д. В. Литвинова, М. В. Кашкарова. Исследование динамики капель ферридной суспензии в магнитном поле методами оптической диагностики 71
13. В. В. Рахманов, С. В Двойнишников, В. Г. Меледин, Г. В. Бакакин. Экспериментальное исследование параметров микропроцессорного термокомпенсированного биполярного источника напряжения смещения для кремниевых фотоумножителей 78
14. В. О. Зуев, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, В. А. Павлов. Метод фазовой триангуляции с адаптацией к нелинейности приемно-передаточной функции в условиях случайных аддитивных помех 84
15. М. А. Воробьев, А. О. Кархов. Влияние поверхностно-активных веществ на размеры газовых пузырей в потоке жидкости в наклонном канале 91

16. М. В. Кашкарова, А. Ю. Кравцова. Мониторинг скорости возвратного течения вблизи структурных поверхностей обтекаемого тела при кавитации 97
17. С. В. Двойнишников, Г. В. Бакакин, В. О. Зуев, В. В. Рахманов. Прецизионный оптико-электронный метод измерения диаметра движущихся цилиндрических объектов 102
18. В. Г. Меледин, С. В. Кротов, В. Г. Главный, О. Ю. Садбаков. Модуль генератора тока накачки мощного импульсного полупроводникового лазера для трекового измерителя скорости 107
19. А. В. Черданцев, Л. П. Трубицына, А. З. Квон. Выбор оптимальной конфигурации для PTV-измерений в кольцевом газожидкостном течении 113
20. А. В. Бобылев, В. В. Гузанов, А. В. Черданцев. Компенсация оптических искажений при измерении толщины пленки на боковой поверхности цилиндра 120
21. А. З. Квон, В. В. Гузанов, А. В. Черданцев. Трехмерные измерения скорости в волновом ручейке с использованием камеры светового поля 128
22. Л. П. Трубицына, А. В. Черданцев. Метод стереоскопической лазерно-индуцированной флуоресценции для исследования срыва капель с поверхности жидкости 132
23. С. А. Здорников, А. В. Черданцев. Идентификация пространственно-временных траекторий волн возмущения в ЛИФ-данных на основе преобразования Радона 136
24. С. А. Здорников, Л. П. Трубицына, С. В. Исаенков, А. В. Черданцев. Влияние входной конфигурации на подъем жидкости двухфазного течения в горизонтальной трубе 142
25. Д. Е. Легостаев, Н. А. Гуляев, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов. Движение газовых пузырей через пучок горизонтальных труб при нисходящем течении жидкости 149
26. Т. А. Сапаев, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов. Структура двухфазного пузырькового течения в кольцевом канале с вращающимся внутренним цилиндром 155
27. И. К. Кабардин, П. Д. Лобанов, В. Г. Главный, М. Р. Гордиенко. Изучение гидродинамики потока в модели аппарата колонного типа с помощью матричной электроимпедансной диагностики 160
28. К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, В. Г. Меледин, С. В. Двойнишников. Развитие метода ЛДА путем применения кремниевого ФЭУ и упрощенной оптической схемы для диагностики потока через многофазный барьер 164
29. К. А. Филиппский, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов. Влияние формы преграды на структуру двухфазного нисходящего течения в прямоугольном канале 169
30. Д. Д. Болотов. Постобработка деталей, изготовленных методом стереолитографии 174

31. И. Д. Гельбутовский, Л. В. Шебалкова. Обнаружение БПЛА с малой ЭПР на основе технологий MIMO и адаптивного формирования луча 181
32. С. К. Мялкин. Об оптимизации результатов 3D печати по технологии mSLA..... 187
33. А. В. Мищенко, Е. В. Проскуряков, М. В. Сорокин, А. П. Исаков. Кумулятивный заряд с двухслойной облицовкой..... 195

CONTENTS

1. L. V. Shastin. Prospects for the use of femtosecond laser lines in atmospheric telecommunication and monitoring lines 3

2. A. G. Sedukhin, M. S. Koltashova. Optical systems based on axicon and lens elements and improvement of their characteristics in forming tunable annular laser beams 7

3. V. E. Zaitseva, V. P. Korolkov. Possibility of creating multilayer diffraction attenuators 14

4. S. A Shoydin, A. L. Pazoev. The structured light pattern works like a hologram 20

5. V. I. Nalivaiko. Structure and spatial resolution of chalcogenide resists of As_2S_3 composition 27

6. Yu. Ts. Batomunkuev. Achromatization of nonaxial holografic optical element 34

7. Yu. Ts. Batomunkuyev, V. I. Zhukov, D. A. Shvetsov. Determining the sizes of bubbles in Novec 649 fluid 37

8. A. A. Luzanov, I. A. Konyakhin. Multi-channel optoelectronic system for measuring the deformations of a shipbuilding dock 42

9. A. Syrbakov, I. A. Zarubin, A. A. Dzuba, S. V. Dodonov. Application of an echelle spectrometer for scintillation emission spectral analysis 50

10. A. L. Pazoev. Increasing the performance of the algorithm for calculating integral transformations by limiting the multidimensional space of acceptable solutions 57

11. A. M. Oborin, K. S. Zubanov, S. V. Dvoinishnikov. Development of software module for processing signals from laser doppler anemometers 66

12. A. Y. Kravtsova, A. V. Trubin, D. V. Litvinova, M. V. Kashkarova. Study of the dynamics of ferride suspension droplets in a magnetic field using optical diagnostic methods 71

13. V. V. Rakhmanov, S. V. Dvoynishnikov, V. G. Meledin, G. V. Bakakin. Experimental study of parameters of a microprocessor-based temperature-compensated bipolar bias voltage source for silicon photomultipliers 78

14. V. O. Zuev, S. V. Dvoynishnikov, V. G. Meledin, V.A. Pavlov. Phase triangulation method with adaptation to receiving-transmitting function nonlinearity under the random additive noise conditions 84

15. M. A. Vorobyev, A. O. Karhov. The effect of surfactants on the size of gas bubbles in a fluid flow in an inclined channel 91

16. M. V. Kashkarova, A. Yu. Kravtsova. Monitoring of the re-entrant flow velocity near the structural surfaces of a body during cavitation 97

17. S. V. Dvoynishnikov, G. V. Bakakin, V. O. Zuev, V. V. Rakhmanov. Precision optical-electronic method for measuring the diameter of moving cylindrical objects 102

18. V. G. Meledin, S. V. Krotov, V. G. Glavny, O. Yu. Sadbakov. Module of the pump current generator for a high-power pulsed semiconductor laser for a track-based velocity meter 107

19. A. V. Cherdantsev, L. P. Trubitsyna, A. Z. Kvon. Selecting optimal configuration for PTV-measurements in annular gas-liquid flow 113

20. A. V. Bobylev, V. V. Guzanov, A. V. Cherdantsev. Compensation of optical distortions in the film thickness measuring on the side of cylinder surface 120

21. A. Z. Kvon, V. V. Guzanov, A. V. Cherdantsev. Three-dimensional velocity measurements in wavy rivulet using light field camera 128

22. L. P. Trubitsyna, A. V. Cherdantsev. Stereoscopic laser-induced fluorescence for studying droplet entrainment in liquid flows 132

23. S. A. Zdornikov, A. V. Cherdantsev. Identification of spatiotemporal trajectories of disturbance waves in LIF-data based on Radon transform 136

24. S. A. Zdornikov, L. P. Trubitsyna, S. V. Isaenkov, A. V. Cherdantsev. The effect of the inlet configuration on the rise of a liquid in a horizontal two-phase flow 142

25. D. E. Legostaev, N. A. Gulyaev, I. A. Evdokimenko, P. D. Lobanov. Movement of gas bubbles through a bundle of horizontal tubes during downward liquid flow 149

26. T. A. Sapaev, I. A. Evdokimenko, P. D. Lobanov. Structure of two-phase bubble flow in an annular channel with a rotating inner cylinder 155

27. I. K. Kabardin, P. D. Lobanov, V. G. Glavny, M. R. Gordienko. Study of flow hydrodynamics in a column-type apparatus model using matrix electrical impedance diagnostics 160

28. K. S. Zubanov, I. K. Kabardin, V. G. Meledin, S. V. Dvoynishnikov. Development of the LDA method by using a silicon photomultiplier and a simplified optical scheme for flow diagnostics through a multiphase barrier 164

29. K. A. Filippskii, I. A. Evdokimenko, P. D. Lobanov. Influence of obstacle geometry on the structure of two-phase downward flow in a rectangular channel 169

30. D. D. Bolotov. Post-processing of parts manufactured using stereolithography 174

31. I. D. Gelbuotovsky, L. V. Shebalkova. Detection of low-rcs uavs based on mimo and adaptive beamforming technologies 181

32. S. K. Myalkin. About optimizing the results of mSLA technology 3D printing 187

33. A. V. Mischenko, E. V. Proskuryakov, M. V. Sorokin, A. P. Isakov. Shaped charge with double-layer lining 195

Научное издание

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ

XXII Международный научный конгресс

Сборник материалов в 9 т.

Т. 8
Международная научная конференция

«СИБОПТИКА-2026. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ»

№ 1

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *А. Бочарниковой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 22.10.2026. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 12,03. Тираж 25 экз. Заказ 202.
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Издательско-полиграфический центр СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.