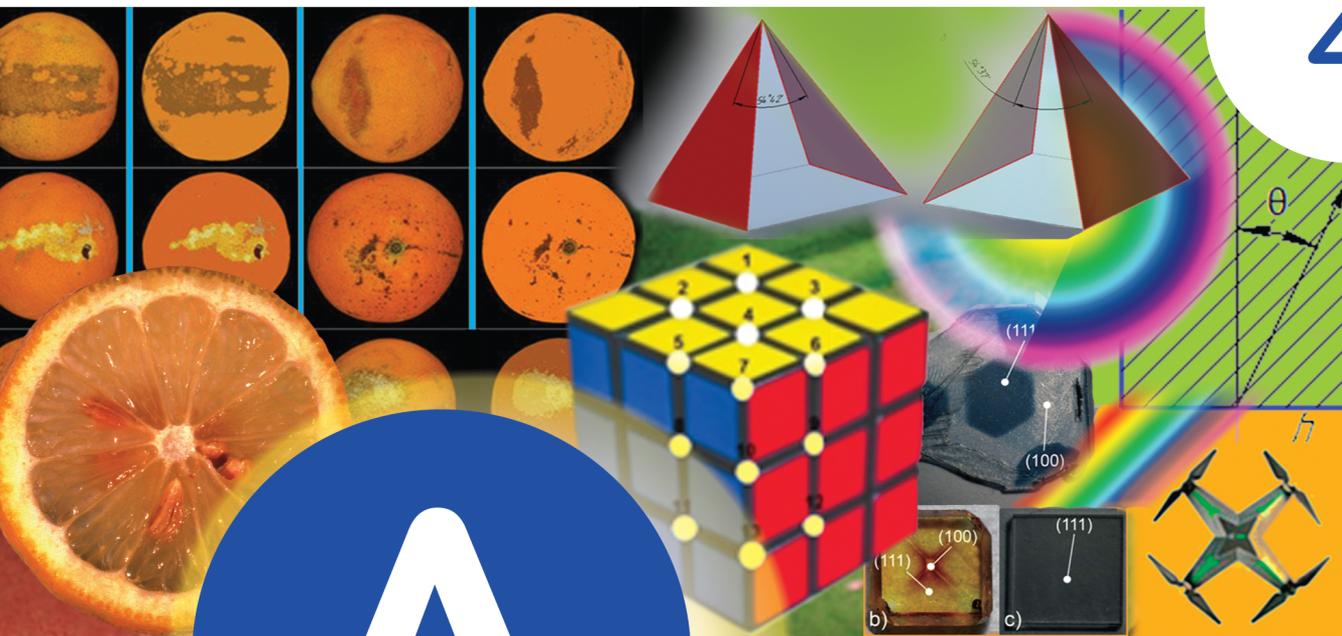




УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

4



# Альманах

НАУЧНЫХ РАБОТ  
МОЛОДЫХ  
УЧЕНЫХ

2020

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**АЛЬМАНАХ НАУЧНЫХ РАБОТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ  
УНИВЕРСИТЕТА ИТМО**

Том 4

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2020**

**Альманах научных работ молодых учёных Университета ИТМО.** Том 4. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 137 с.

Издание содержит результаты научных работ молодых учёных, доложенные на XLIX научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематике: фотоника.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

##### **Председатель редколлегии:**

Бугров Владислав Евгеньевич

доктор физико-математических наук, доцент,

директор мегафакультета фотоники Университета ИТМО.

##### **Члены редколлегии:**

Бахолдин Алексей Валентинович

кандидат технических наук, доцент, декан факультета прикладной оптики

Вейко Вадим Павлович

доктор технических наук, профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники

Вознесенская Анна Олеговна

кандидат технических наук, доцент факультета прикладной оптики, заместитель директора мегафакультета фотоники

Коротаев Валерий Викторович

доктор технических наук, профессор факультета прикладной оптики

Успенская Майя Валерьевна

доктор технических наук, профессор факультета прикладной оптики

ISBN 978-5-7577-0636-8

ISBN 978-5-7577-0640-5 (Том 4)



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, получивший в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Миссия Университета ИТМО – открывать возможности для гармоничного развития конкурентоспособной личности и вдохновлять на решение глобальных задач.

© Университет ИТМО, 2020

© Авторы, 2020

## **ВВЕДЕНИЕ**

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные 29 января – 1 февраля 2020 года на XLIX научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематике: фотоника.

Конференция проводится в целях усиления интегрирующей роли университета в области научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники и ознакомления научной общественности с результатами исследований, выполненных в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, программы развития Университета ИТМО на 2009–2018 годы, программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг., Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», грантов Президента РФ для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ, грантов РФФИ, РГНФ, РНФ и Правительства РФ (по постановлению № 220 от 09.04.2010 г.) и по инициативным научно-исследовательским проектам, проводимым учеными, преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами, магистрантами и студентами университета, в том числе в содружестве с предприятиями и организациями Санкт-Петербурга, а также с целью повышения эффективности научно-исследовательской деятельности и ее вклада в повышение качества подготовки специалистов.

**НАПРАВЛЕНИЕ  
ФОТОНИКА**



**Аверьянов Владимир Андреевич**

Год рождения: 1996  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы №42081,  
направление подготовки: 12.04.02 – Оптотехника,  
e-mail: abuelos@yandex.ru



**Васильев Александр Сергеевич**

Год рождения: 1988  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., доцент,  
e-mail: a\_s\_vasilev@itmo.ru

УДК 535.343.32

**РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕДА**

**В.А. Аверьянов**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.С. Васильев**

**Аннотация**

В данной работе актуализирована необходимость дополнения методов контроля качества меда спектральным анализом. Так же приведено краткое описание схемы, принципа работы и основные проектируемые параметры оптико-электронного комплекса для контроля качества меда, выполняющего измерения спектров поглощения меда. Указаны основные направления дальнейшего развития разработки.

**Ключевые слова**

Спектральный анализ, мёд, инфракрасное излучение, спектр поглощения, метод контроля, дифракционная решетка.

На сегодняшний день контроль качества меда является актуальной задачей. Данное обстоятельство вызвано большим количеством фальсифицированной медовой продукции на прилавках магазинов [1]. Наиболее распространённый способ фальсификации – это выдача дешевых сортов меда за более дорогие. Также применяется технология производства суррогатного меда, в том числе из медового порошка (сухой мед) [2].

ГОСТ устанавливает основные методики проверки меда. Чтобы повысить вероятность обнаружения подделки обычно используется несколько методов одновременно. Как правило, все основаны на разных физических принципах [3]. Поэтому в качестве дополнения к существующим методам предлагается ввести спектральный анализ меда. Данный метод обладает рядом преимуществ – малое время на получение результата измерений, отсутствие необходимости работы с реактивами [4].

Разрабатываемый комплекс представляет собой малогабаритный спектрометр с рабочим диапазоном длин волн от 900 до 2200 нм. Основной измеряемой характеристикой является измерение спектров поглощения меда. В таблице приведены основные проектируемые параметры комплекса.

Таблица

**Основные проектируемые параметры комплекса**

Параметр	Величина
Рабочий спектральный диапазон	900–2200 нм
Количество элементов сенсора	512 пикс.
Входная апертура	25 мкм
Оптическое разрешение	10 нм
Время интегрирования	100 мкс
Компьютерный интерфейс	USB 2.0
Условия эксплуатации	от +10 до +35
Электропитание	220 В, 50 Гц
Габаритные размеры	400x400x500 мм
Вес	5,5 кг

В качестве источника излучения используется галогеновая лампа, для ее стабильной работы применяется импульсный режим питания, а также система термостабилизации. Исследуемый образец (мед) помещается в кювету из кварцевого стекла. В основе оптической схемы лежит неперекрестная схема Черни-Тернера. Главными преимуществами являются высокое спектральное разрешение, малые габариты [5].

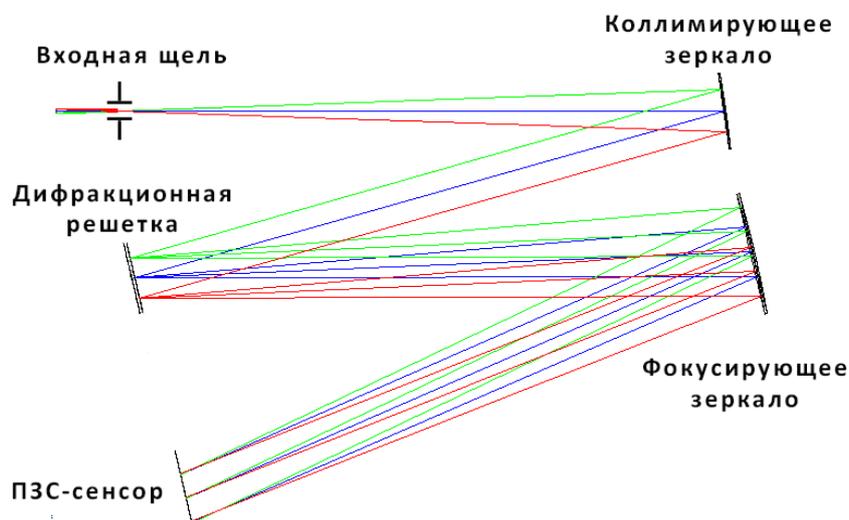


Рисунок. Обобщенная оптическая схема комплекса

На рисунке представлена обобщенная оптическая схема спектрометра. Излучение, прошедшее через кювету с образцом, попадает на входную щель спектрометрического узла. Затем коллимирующее вогнутое зеркало преобразует световой поток, прошедший через входную щель, в параллельный пучок. Данный пучок падает на отражательную дифракционную решетку с нарезным профилем.

Полученный спектр наблюдается в 1-м порядке дифракции. Этот спектр формируется фокусирующим вогнутым зеркалом на плоскости ПЗС-сенсора.

Аналоговый сигнал, считанный ПЗС-сенсором, попадает в усилитель, а затем преобразуется в цифровой сигнал в аналого-цифровом преобразователе (АЦП). Блок обработки регулирует степень усиления усилителя. Корректный сигнал с АЦП передаётся блоком обработки на компьютер через выходной разъем интерфейса в виде USB 2.0. Все активные блоки комплекса получают питание от встроенного блока питания. Полученные результаты о результатах измерений планируется отображать на экране компьютера в специальном программном обеспечении.

При введении метода спектрального анализа меда в ГОСТ, регулирующего методы контроля качества меда, позволит применять данную установку, что позволит с большей вероятностью выявлять фальсифицированный мед. Дальнейшим развитием данного комплекса, будет расширение его спектрального диапазона в видимую и среднюю ИК-области, а также оптимизация под другие виды исследований пищевой продукции.

### Литература

1. Экспертиза меда: антибиотики, фальсификат, вода [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.spb.kp.ru/daily/26613/3630871/> (дата обращения 10.12.2019).
2. Заикина В.И. Экспертиза меда и способы обнаружения его фальсификации: Учебное пособие / В. И. Заикина. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2012. 168 с.
3. ГОСТ 19792-2017 Мед натуральный. Технические условия (с Поправкой).
4. Исследование метода спектрального анализа для определения натуральности меда. Ковшова К.А., Сыпин Е.В., Лисаков С.А., Бийский технологический институт АлтГУ, г. Бийск. Южно-Сибирский научный вестник, 4 (12), декабрь 2015 г.
5. Palmer C. Diffraction grating handbook // THERMO RGL (Richardson Grating Laboratory). 2002. P. 204.



**Антипенкова Дарья Андреевна**

Год рождения: 1998

Университет ИТМО,

факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,  
студент группы №L3416,

направление подготовки: 12.03.05 – Лазерная техника  
и лазерные технологии,

e-mail: daria.antipenkova@mail.ru



**Варламов Павел Викторович**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО,

факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,  
студент группы №L42171,

направление подготовки: 12.04.05 – Лазерная техника  
и лазерные технологии,

e-mail: p.v.varlamov@gmail.com



**Синев Дмитрий Андреевич**

Год рождения: 1991

Университет ИТМО,

факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,  
к.т.н., ассистент,

e-mail: sinev@itmo.ru

УДК 544.032.65

**АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**НА ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ТИТАНА**

**Д.А. Антипенкова, П.В. Варламов**

**Научный руководитель – к.т.н. Д.А. Синев**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

В работе исследован процесс микроstructuring тонкой пленки титана при термохимическом воздействии лазерного излучения с длиной волны 405 нм. Определены пороговые режимы и основные особенности прямой лазерной записи микроструктур.

**Ключевые слова**

Лазерное окисление, титан, тонкие пленки, микроструктуры, лазерная термохимическая запись.

Термохимическое действие лазерного излучения на тонкие пленки является

основой целого ряда технологических процессов формирования планарных элементов и структур в оптике, микроэлектронике, информационных системах и т.п. В последние годы интерес к этому направлению возрос вследствие ужесточения требований к разрешающей способности и размерам получаемых элементов [1-3].

Комплекс обратных термических, химически и оптических связей, возникающих при обработке пленок титана, вызывает интерес в связи с теоретически предсказанными возможностями получения записи информации со сверхвысоким разрешением [1, 2]. Для дальнейшего увеличения разрешения записи целесообразно использовать для записи коротковолновое излучение, но при этом необходимо учитывать спектральную зависимость поглощения материалов. В литературных источниках (см. к примеру, [4]) отмечается увеличение поглощения диоксида титана при приближении к УФ диапазону, что может привести к существенному изменению комплекса обратных связей. Таким образом, представляет интерес исследование особенности окисления тонких пленок титана в диапазоне длин волн, близком к ультрафиолетовой области спектра.

Целью настоящей работы является изучение особенностей одноэтапной лазерной термохимической записи на пленках титана при воздействии лазерного излучения с длиной волны 405 нм. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Определение пороговых значений плотности мощности, достаточной для образования контрастных оксидных структур на тонкой пленке титана при экспонировании сфокусированным пучком лазерного излучения с длиной волны 405 нм.
2. Регистрация треков в режиме термохимической записи на поверхности пленок титана при перемещении образца относительно сфокусированного лазерного пучка.
3. Исследование геометрических характеристик сформированных металлооксидных структур.

Исследуемые в настоящей работе методы записи были экспериментально реализованы с помощью непрерывного диодного лазера, излучающего на длине волны 405 нм. Упрощенная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Стеклообразный образец с напыленной пленкой титана (толщина пленки порядка 300 нм) располагается на 3х координатном столе марки Thorlabs. Микрофотографии результатов обработки получены с помощью светового микроскопа Carl Zeiss Axio Imager A1m в отраженном и проходящем свете. Мощность лазерного излучения контролировалась при помощи измерителя мощности Gentec-EO Solo2. Профиль поверхности пленки после обработки был изучен на сканирующем зондовом микроскопе NT-MDT Nanoeducator.

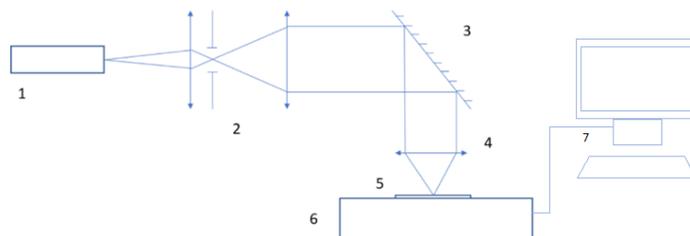


Рис. 1. Схема установки: 1 – диодный лазер 405 нм LSR405CP-2W ( $P_{\max} = 2$  Вт),  
2 – телескопическая система с диафрагмой ( $\Gamma=1,6^x$ ), 3 – зеркало, 4 – объектив ЛОМО,  $10^x$ ,  
5 – пленка титана с толщиной 300 нм, нанесенная на стеклянную подложку К8,  
6 – 3х координатный стол, 7 – управляющий ПК

Была исследована зависимость размеров и качества получаемых структур от

мощности излучения и длительности воздействия (рис. 2). Пороговые значения излучённой плотности энергии для получения контрастных структур находятся в диапазоне 2,8-3,7 ГДж/м<sup>2</sup>.

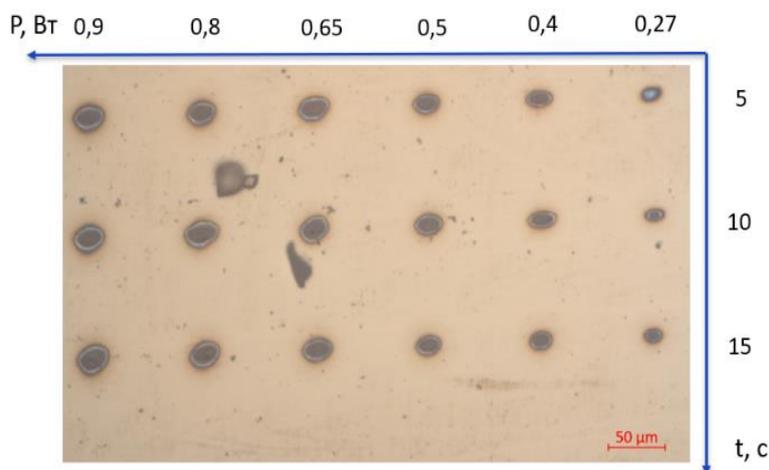


Рис. 2. Результат обработки тонкой пленки титана лазерным излучением с изменением мощности от 0,9 Вт до 0,27 Вт (по горизонтали) и временем воздействия от 5 с до 10 с (по вертикали)

Минимальный размер обработанной области был достигнут при плотности энергии 3,7 ГДж/м<sup>2</sup>. Результат обработки представляет собой эллипс 5 мкм и 12 мкм по двум осям, что примерно в два раза меньше оценок размера исходного пучка (рис. 3).

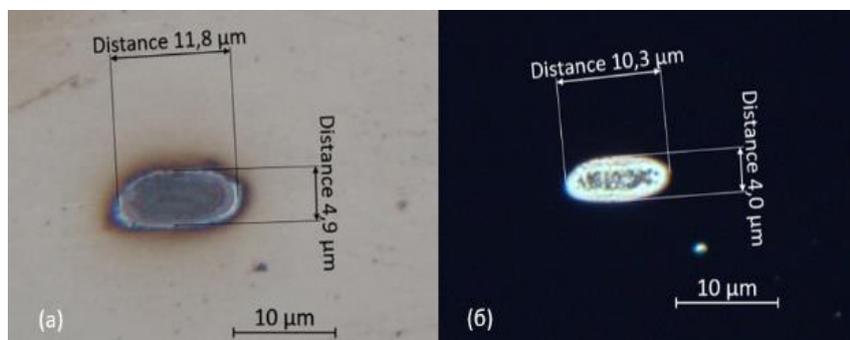


Рис. 3. Результат обработки тонкой пленки титана лазерным излучением с плотностью энергии 3,7 ГДж/м<sup>2</sup> в отраженном (а) и проходящем (б) свете

Морфология записанных микроструктур неоднородна (рис. 4) и отличается от типичных результатов окисления [3] или абляции [5] тонкой пленки титана. Предположительно, причиной возникновения неоднородностей являются объёмные фазово-структурные дефекты в оксидном слое.

С целью более детального изучения структур были записаны линии шириной порядка 8 и 11 мкм при мощности  $P = 0,4$  Вт и скоростях сканирования 0,01 мм/с, 0,05 мм/с (рис. 5).

Сканирующая зондовая микроскопия, проведенная в зоне лазерной обработки, выявила утолщение пленки (рис. 6) в результате термохимического воздействия, и таким образом, было показано, что формирование структуры, действительно, носит термохимический, а не абляционный характер.

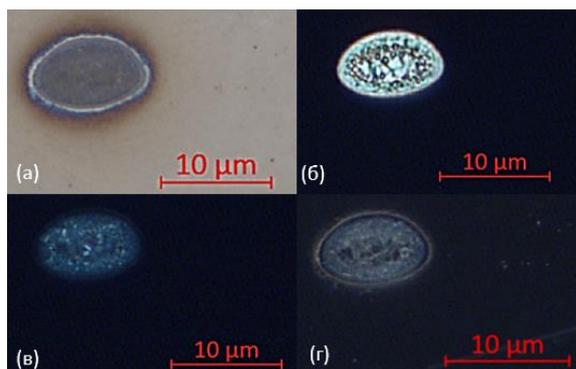


Рис. 4. Результат обработки тонкой пленки титана лазерным излучением с плотностью энергии 5,5 ГДж/м<sup>2</sup> в отраженном (а) свете, в лучах параллельных (б) и скрещенных (в) поляризаторов, в темном поле (г)

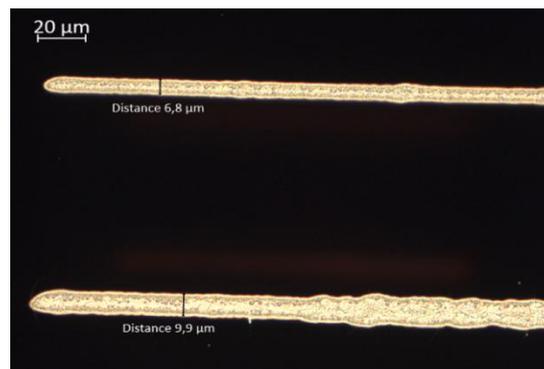


Рис. 5. Результат записи линии на тонкой пленке титана лазерным излучением с мощностью 0,4 Вт и скоростью сканирования 0,1 мм/с и 0,05 мм/с в проходящем свете



Рис. 6. Результат измерений высоты рельефа, произведенном в программе Nanoeducator

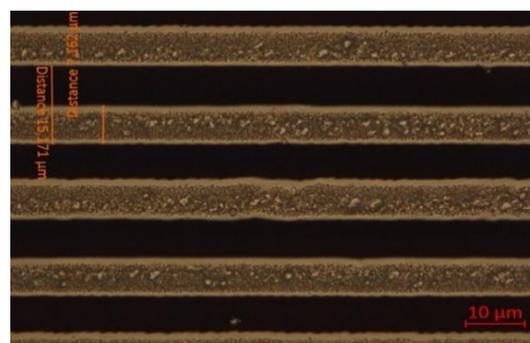


Рис. 7. Результат записи периодической решетки на тонкой пленке титана лазерным излучением с мощностью 0,4 Вт и скоростью 0,1 мм/с сканирования в проходящем свете

В то же время характерный рельеф, соответствующий фазово-структурным дефектам, выявленным при оптической микроскопии (рис. 4), на поверхности обнаружен не был.

После определения областей рабочих режимов записи была рассмотрена возможность записи линий вплотную друг к другу (рис. 7). При ширине линии в 7 мкм возможна запись периодической решетки с периодом 16 мкм без существенного температурного влияния линий друг на друга. Таким образом, достигнуто разрешение записи 70 лин/мм.

В результате проведённого исследования:

- определены рабочие режимы записи микроструктур на тонкой пленке титана лазерным излучением с длиной волны 405 нм;
- размеры единичной структуры составляют 5 мкм и 15 мкм (по осям эллипса), а достигнутое разрешение периодической решетки – 70 лин/мм;
- обнаружены фазово-структурные дефекты в области экспонирования лазерным излучением при плотности энергии 3,7 ГДж/м<sup>2</sup>.

Полученные результаты могут быть использованы для одноэтапной записи амплитудной дифракционной решетки произвольных размеров с разрешением до 70 лин/мм, а также для поиска режимов записи с более высоким разрешением (по предварительным оценкам, до 500 линий/мм). Интерес представляет также анализ спектральных характеристик записанных структур и изучение объёмных микродефектов.

### Литература

1. Veiko V.P., Shakhno E.A., Sinev D.A. Laser thermochemical writing: pursuing the resolution//Optical and Quantum Electronics, 2016, Vol. 48, No. 6, pp. 322
2. Veiko V.P., Nguyen Q., Shakhno E.A., Sinev D.A., Lebedeva E.V. Physical similarity of the processes of laser thermochemical recording on thin metal films and modeling the recording of submicron structures//Optical and Quantum Electronics, 2019, Vol. 51, No. 11, pp. 348.
3. Shakhno E.A., Sinev D.A., Kulazhkin A.M. Features of laser oxidation of thin films of titanium//Journal of Optical Technology, 2014, Vol. 81, No. 5, pp. 298-302.
4. Dakka A. et al. Optical study of titanium dioxide thin films prepared by RF sputtering //Moroccan Journal of Condensed Matter. 1999. Т. 2.
5. Бармина Е.В. и др. Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты //Квантовая электроника. 2010. Т. 40. №. 11. С. 1012-1020.



**Ахлебинина Анна Сергеевна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

студент группы № 7764,

направление подготовки: 05.11.07 – Оптические

и оптико-электронные приборы и комплексы,

e-mail: aakhlebinina@mail.ru

УДК 062.00

## **АНАЛИЗ УТОЧНЯЮЩИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ВИДЕОЭНДОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**А.С. Ахлебинина**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор М.Н. Сокольский<sup>1</sup>**

**1 – Университет ИТМО**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и свойств решения прикладных задач фотоники».

### **Аннотация**

Доклад посвящен анализу современных диагностических методов в оптико-электронных эндоскопических системах. Приведено краткое описание методов исследования, выявлены недостатки методов и определены главные направления дальнейшего развития эндоскопических методик.

### **Ключевые слова**

Оптико-электронные эндоскопические системы, видеоэндоскопы, флуоресценция, виртуальная хромоскопия, узкоспектральная диагностика.

Видеоэндоскопические исследования желудочно-кишечного тракта выполняются с целью:

- визуальной диагностики заболеваний ЖКТ (гастрит, язва, пищевод Баррета, дисплазия слизистой, обнаружение *helicobacter pilori* и др., но в первую очередь – злокачественная онкология);
- взятия биопсии;
- выполнения эндохирургических вмешательств.

Большинство заболеваний ЖКТ, перечисленных выше, относятся к предраковым заболеваниям. Онкологические заболевания являются одними из наиболее сложных в диагностике и лечении. Прежде всего потому, что на ранних стадиях рака практически отсутствуют клинические проявления.

Стандартное эндоскопическое обследование позволяет наблюдать в белом свете только состояние наружной поверхности слизистой оболочки, а опухолевые процессы зарождаются внутри слизистого слоя. Поэтому, для повышения чувствительности и специфичности диагностики на ранних стадиях болезни, развитие современных оптико-электронных эндоскопических систем направлено на:

- улучшение качества изображения, в первую очередь – повышение разрешающей способности создаваемого изображения;

– создание методов исследования, способствующих получению изображений, в которых контрастируются проблемные участки слизистой.

К таким методам относят:

- двуфокальная эндоскопия;
- флуоресцентная эндоскопия (собственная, вторичная);
- оптическая когерентная томография;
- хромоскопия;
- виртуальная хромоскопия.

### **Двуфокальная эндоскопия**

Принцип основан на устранении остаточной расфокусировки в диапазоне ближнего фокуса (от 2 до 6 мм), за счет чего существенно улучшается качество изображения (высокий контраст и разрешающая способность).

### **Флуоресцентная эндоскопия**

Флуоресценция – это способность веществ и соединений к свечению при воздействии на них источником света. Различают собственную (аутофлуоресценцию) (рис. 1) и вторичную (введение в организм специальных флуоресцирующих веществ, связывающихся с клетками и тканями организма) флуоресценции [1].

Применение флуоресценции в видеоэндоскопии основано на выявленном явлении, что в зеленой области флуоресценция пораженных тканей меньше, чем у здоровых, а в красной области – больше.

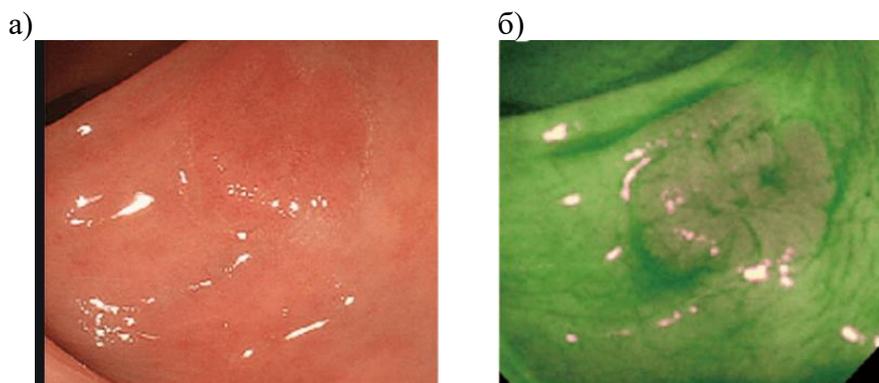


Рис. 1. а) изображение в стандартном белом свете;  
б) флуоресцентное изображение этого же участка [1]

Недостатками данного метода является то, что существует большое количество ложноположительных результатов, которые возникают из-за того, что не всегда четко отделяется воспалительный процесс от злокачественных образований, а также то, что применение красителей вводит ограничения в случае необходимости повторного проведения операции.

### **Оптическая когерентная томография в эндоскопии**

Оптическая когерентная томография (ОКТ) – это оптический метод исследования, заключающийся в освещении тканей организма низкокогерентным излучением ближнего инфракрасного диапазона и получении изображений с высоким уровнем разрешения, характеризующих внутреннюю пространственную структуру за счет регистрации степени рассеяния зондирующего излучения, назад рассеянного на оптических неоднородностях, и измерении соответствующей задержки [2].

Использование метода ОКТ в эндоскопии позволило получать изображение слизистого слоя толщиной до 1,5 мм, которая недоступна для обычных эндоскопов (рис. 2).

Главным недостатком ОКТ в эндоскопии является малая область сканирования (р-р 2х2 мм), что не позволяет применять его в качестве поискового метода.

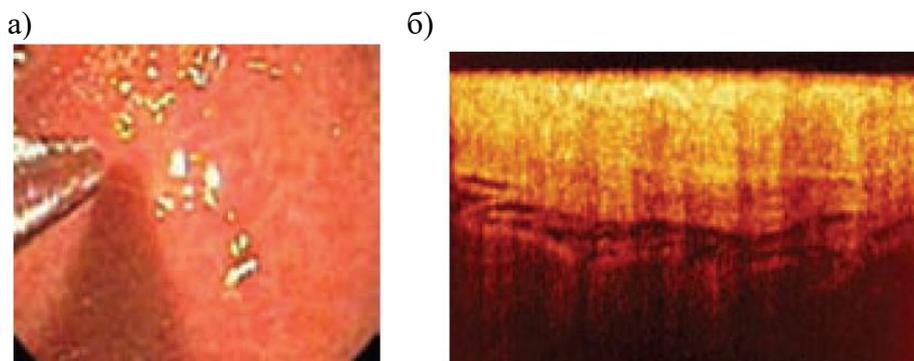


Рис. 2. Хронический колит: а) изображение в белом свете, б) ОКТ-изображение

### Хромоскопия

Хромоскопия – это прижизненный метод окраски слизистой оболочки органа с целью усиления её рельефа для выявления мелких поражений слизистой, их протяженности, определения границ и детализации структурных особенностей (рис. 3).

Окраска слизистой оболочки осуществляется с помощью эндоскопического спрея, который распыляет на нее специальное красящее вещество. Наиболее часто используют следующие красящие вещества:

- индигокармин;
- метиленовый синий.

Однако на сегодняшний день возникают сомнения о безопасном применении метиленового синего в той концентрации, которая вводится в организм для осуществления данного метода. К тому же, применение красителей вводит те же ограничения по времени, что и во флуоресцентном методе.

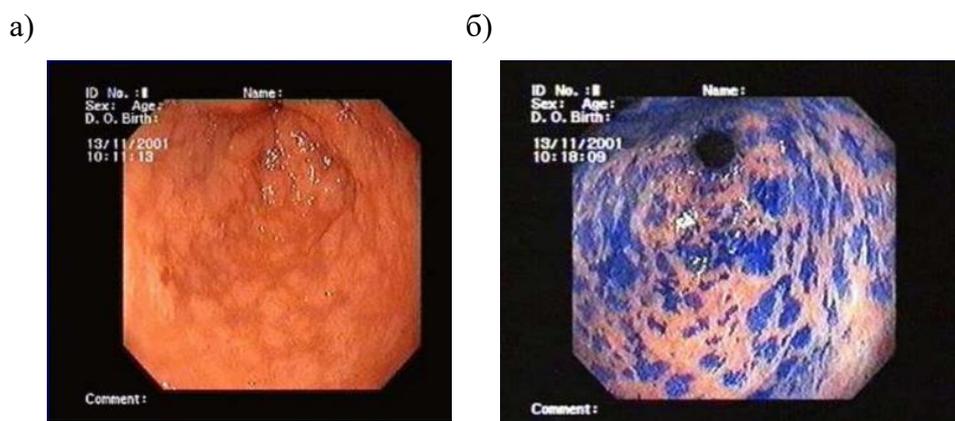


Рис. 3. а) стандартное эндоскопическое изображение, б) эндоскопическое изображение после применения красителей [3]

### Виртуальная хромоскопия

Виртуальная (цифровая) хромоскопия – это изменение цвета в изображении сосудистого рисунка слизистой оболочки, усиление его контраста, а также усиление рельефа изображения слизистой оболочки с помощью освещения ее узкими полосами

светового излучения (NBI - Olympus) или цифровой обработкой изображения в реальном времени (i-Scan, FICE).

#### **NBI Olympus**

NBI (narrow band imaging) – технология контрастирования оптического изображения, повышающая видимость сосудов и других тканей на поверхности слизистой и в подслизистом слое (рис. 4) [4].

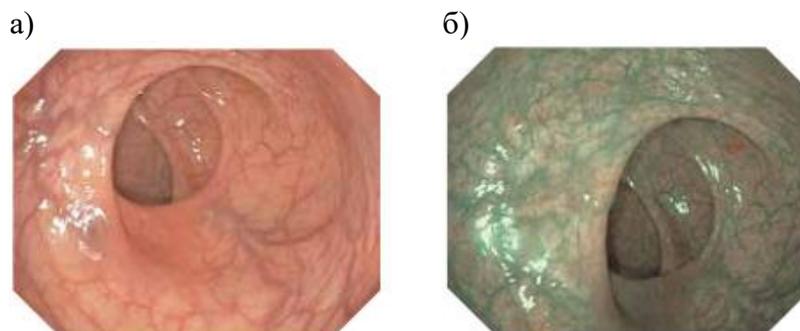


Рис. 4. а) изображение в белом свете; б) – изображение с NBI [4]

#### **i-Scan PENTAX Medical**

Технология i-scan - это технология цифровой обработки изображения в реальном времени, разработанная компанией PENTAX Medical (рис. 5) [5].

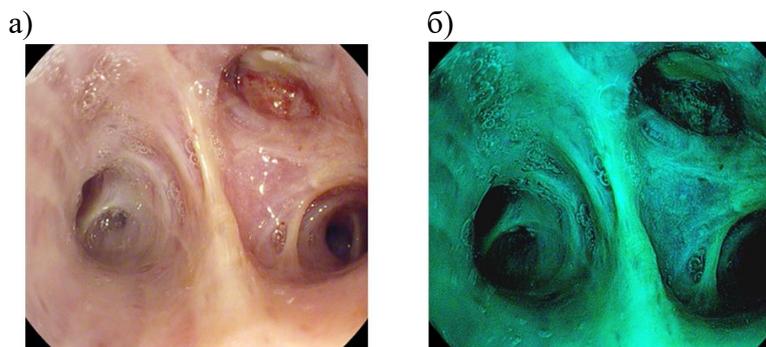


Рис. 5. а) изображение в белом свете, б) изображение с усилением тона [5]

В настоящее время, существует 5 диагностических методов видеоэндоскопических исследований: двуфокальная эндоскопия, флуоресцентная эндоскопия, оптическая когерентная томография, хромоскопия и виртуальная хромоскопия, которые были рассмотрены выше. В ходе этого рассмотрения было выявлено, что перспективы своевременной диагностики патологических состояний слизистой оболочки связаны, в первую очередь, с широким клиническим применением эндоскопической методики – виртуальной хромоскопии, позволяющей прогнозировать гистологическую структуру тканей и визуализировать их сосудистый рисунок, что значительно облегчает поиск микроскопических предраковых патологий.

Однако быстрое развитие новых технологий, постоянный рост научных знаний создают необходимые условия для появления новых диагностических методов в медицине, которые позволяют уменьшить необходимость взятия обычной биопсии, а также позволяет быстрее поставить диагноз и назначить лечение.

### Литература

1. Louis-Michel Wong Kee Song et al. Autofluorescence imaging // *Gastrointestinal endoscopy*. 2011. V. 4. P. 647-650.
2. Варламова Л.Л., Берзон Л.Э., Богомолова Л.Е. и др. Применение метода оптической когерентной томографии в эндоскопии // *Оптический журнал*. 2009. № 10. С. 63-70.
3. Kudo S., Tamura S., Nakajima T. et al. Diagnosis of colorectal tumorous lesions by magnifying endoscopy // *Gastrointest Endoscopy*. 1996. V. 44. P. 8-14.
4. Olympus [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.olympus.com.ru/> (дата обращения 14.01.2020).
5. Uni-tec [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.uni-tec.su/obzori/1056-chto-takoe-i-scan-tekhnologii-pentax.html> (дата обращения 14.01.2020).



**Ахмеров Артём Харисович**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

аспирант группы № 7764,

направление подготовки: 05.11.17– Оптические  
и оптико-электронные приборы и комплексы,

e-mail: akakhmerov@itmo.ru



**Васильев Александр Сергеевич**

Год рождения: 1988

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

доцент, к.т.н.,

e-mail: a\_s\_vasilev@itmo.ru

УДК 681.7; 004.932

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА  
КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ЭРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН**

**А.Х. Ахмеров**

**Научный руководитель – к.т.н. А.С. Васильев**

**Аннотация**

Работа посвящена проверке применимости методов комплексирования изображений для пространственного совмещения изображений рабочих лопаток паровых турбин. Приводится общая структура алгоритмов пространственного совмещения двух и более разноразмерных изображений. Показаны результаты экспериментального исследования, указывающие на работоспособность исследуемых методов в рамках решения поставленной задачи.

**Ключевые слова**

Комплексирование изображений, пространственное совмещение изображений, видеоэндоскоп, эрозионный контроль, дефектоскопия, паровые турбины.

**Введение**

В процессе эксплуатации рабочие лопатки (РЛ) паровых турбин подвергаются разрушающим внешним воздействиям, которые могут привести к их поломкам и выходу турбин из строя. Большинство современных методов эрозионного контроля РЛ (кроме визуального контроля при помощи технических эндоскопов) требуют прямого контакта с контролируемым объектом, что приводит к необходимости полной или частичной разборки корпуса турбины. Для снижения трудоемкости диагностики РЛ может быть использована оптико-электронная система эрозионного контроля (ОЭСЭК). Принцип действия ОЭСЭК изображен на рис. 1.

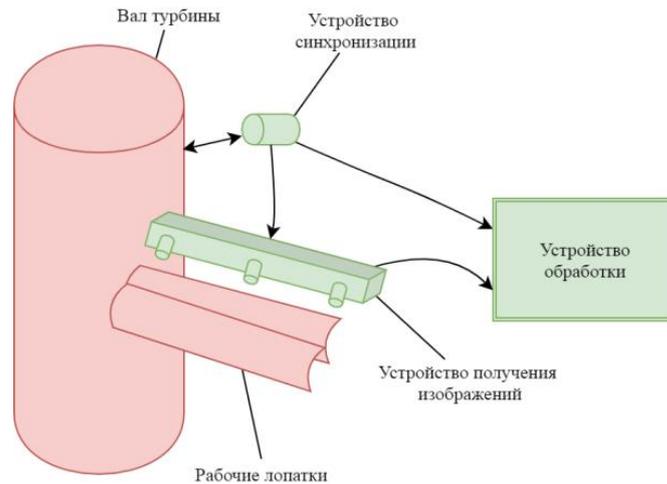


Рис. 1. Принцип действия оптико-электронной системы эрозионного контроля

Основой ОЭСЭК является многоканальное устройство получения изображений (УПИ), позволяющее получать изображения всей поверхности лопадки и использовать их для определения ее геометрических параметров и поиска дефектов на ее поверхности. Для позиционной привязки изображений к положению лопаточного аппарата используется устройство синхронизации (УС). УС отслеживает угловое положение вала турбины, на основе которого может быть определен порядковый номер лопадки в кадре. Устройство обработки (УО) компоует информацию, получаемую с УПИ и УС, а также осуществляет управление их параметрами.

### Описание применяемых алгоритмов

Для получения единого полного изображения РЛ при помощи многоканального УПИ используются алгоритмы пространственного совмещения изображений (ПСИ). Существует множество алгоритмов ПСИ, основанных на построении матрицы преобразования координат (МПК) по выбираемым вручную или автоматически парам точек на двух изображениях, соответствующим одной и той же точке в пространстве [1].

*Выбор опорных точек* можно осуществить силами оператора. Достаточно выбрать точку пространства, проекция которой присутствует на обоих совмещаемых изображениях. Пример выбранных точек показан на рис. 2. Это изображение удобно для выбора точек вручную, так как имеет четкую структуру, которая легко воспринимается на обоих изображениях. Зачастую выбор опорных точек на изображениях с малой областью пересечения является проблематичной и трудоемкой задачей для оператора. В таких случаях, а также при необходимости выбора точек на большом количестве изображений за короткое время, прибегают к автоматическим методам.

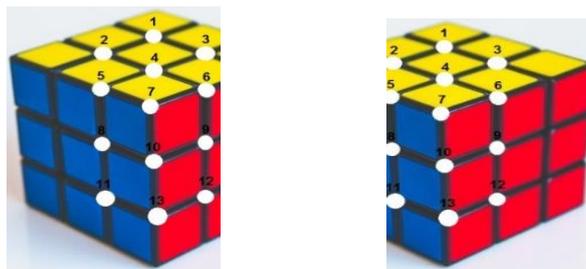


Рис. 2. Опорные точки на изображениях

Автоматический выбор опорных точек может производиться на основе множества параметров присущих конкретным пикселям, либо областям изображений. В рамках данного исследования для автоматического поиска и получения дескрипторов опорных точек применялся алгоритм Speeded Up Robust Features (SURF) [2, 3]. Выбор обусловлен наличием хорошо распознаваемой структуры на макетных экземплярах ПЛ, а также широкой распространенностью SURF и его доступностью в различных программных пакетах [4, 5].

Изображение представляет собой функцию распределения интенсивности в зависимости от координат  $I(x, y)$ . Выбор опорных точек в алгоритме SURF осуществляется путём вычисления определителя матрицы Гессе:

$$H(x, y, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{bmatrix},$$

где  $H(x, y, \sigma)$  – матрица Гессе в точке  $(x, y)$  для масштабного коэффициента  $\sigma$ ;  $L_{xx}(x, y, \sigma)$  – свертка частной производной гауссиана  $g(\sigma)$  второго порядка по  $x^2$  и исходного изображения  $I(x, y)$ ;  $L_{xy}$  и  $L_{yy}$  аналогично для производных гауссиана по  $xy$  и по  $y^2$ . Соответственно, гессиан можно найти следующим образом:

$$\det(H) = L_{xx}(x, y, \sigma) \cdot L_{yy}(x, y, \sigma) - L_{xy}(x, y, \sigma)^2.$$

Следует заметить, что для ускорения работы алгоритма вместо подсчета функции Гаусса используется ее грубая аппроксимация, в связи с чем вводятся дополнительные поправочные коэффициенты. При превышении заданного порога найденным значением определителя матрицы Гессе, точка выбирается, как опорная. Для обеспечения работы с изображениями различного и неоднородного масштаба, вычисления производятся для разных размеров области (окна): от 6x6 пикселей до 195x195 пикселей. Для найденных опорных точек применяются фильтры, построенные на разнонаправленных вейвлетах Хаара [6]. Результаты наложения этих фильтров позволяют выявить доминирующие направления градиента в пределах областей, размеры которых соответствуют размеру окна, использованному при нахождении конкретных опорных точек. Вектор, определяемый преобладающей величиной и направлением градиента в окрестности опорной точки называют ее дескриптором.

В рамках данного исследования сопоставление опорных точек производилось при помощи нахождения дистанции в евклидовом пространстве между их дескрипторами (рис. 3).

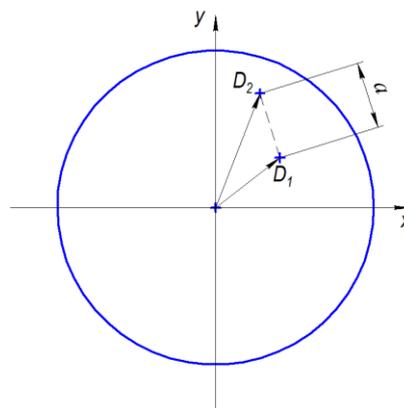


Рис. 3. Дистанция между дескрипторами в евклидовом пространстве

На рис. 3  $D_1$  – дескриптор опорной точки на первом совмещаемом изображении;  $D_2$  – дескриптор опорной точки на втором совмещаемом изображении;  $a$  – дистанция между дескрипторами. Вектора дескрипторов полностью могут быть охарактеризованы координатами  $(x_1, y_1)$  для  $D_1$  и  $(x_2, y_2)$  для  $D_2$ , поэтому меру их различия определить очень просто:

$$a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

Таким образом, для каждого дескриптора опорной точки первого изображения находится соответствующий дескриптор опорной точки второго изображения с минимальным значением дистанции между ними. Проверяется контраст сопоставляемых пикселей: если их контраст по отношению к ближайшим пикселям различен по знаку, они не сопоставляются. На основе пар координат опорных точек с соответствующими друг другу дескрипторами, подбирается проективное преобразование координат для их взаимного пространственного совмещения. Искомое геометрическое преобразование характеризуется матрицей гомографии  $H$ , для которой верно равенство:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix},$$

где  $H$  – матрица гомографии;  $x, y$  – координаты опорной точки пространства на втором изображении;  $x', y'$  – координаты опорной точки пространства на первом изображении;  $h_{ij}$  – элементы матрицы гомографии, каждый из которых связан с одной из степеней свободы [7, 8]. Оба изображения являются двумерными и расположены в своих плоскостях, но так как их плоскости могут быть не параллельны друг другу, необходимо вводить третью пространственную координату. Задача сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} x' = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \\ y' = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \end{cases}$$

Систему уравнений упрощают, вводя допущение:  $h_{33} = 1$ , после чего приводят к следующему виду:

$$\begin{cases} x' = h_{11}x + h_{12}y + h_{13} - h_{31}xx' - h_{32}yx' \\ y' = h_{21}x + h_{22}y + h_{23} - h_{31}xy' - h_{32}yy' \end{cases}$$

На основе полученной системы уравнений и координат полученных опорных точек подбираются и усредняются члены матрицы гомографии  $h_{ij}$ , после чего полученное проективное преобразование применяется ко всему изображению. Для пространственного совмещения более чем двух изображений, охватываемые пространственные области которых пересекаются только у двух «соседних» изображений, проективные преобразования следует применять последовательно (рис. 4).

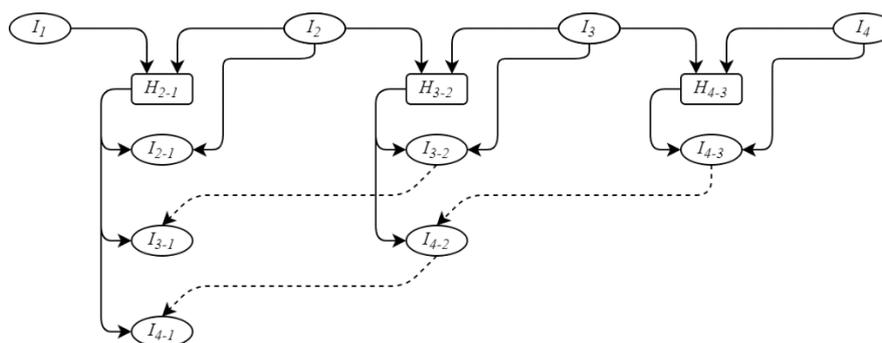


Рис. 4. Последовательное пространственное совмещение четырех изображений

На рис. 3 представлена схема пространственного совмещения четырех изображений  $I_k$  ( $k$  – порядковый номер изображения). Области пространства, изображенные на соседних (по номеру) изображениях, пересекаются. На основе пересекающихся областей строятся матрицы гомографии  $H_{m-n}$ , где  $m$  – номер исходной системы координат,  $n$  – номер системы координат, к которой приводится изображение. Применяя проективное преобразование, характеризующееся матрицей  $H_{m-n}$  на изображение  $I_k$ , можно получить изображение  $I_{k-n}$ , где  $k$  – номер исходного изображения,  $n$  – номер системы координат, к которой приводится изображение  $I_k$ . Таким образом, все изображения приводятся в единую систему координат первого изображения ( $I_{k-1}$ ).

### Описание и результаты эксперимента

Для подтверждения работоспособности представленных алгоритмов при помощи экспериментального стенда были сделаны фотографии макетных образцов лопаток, сделанных при помощи 3D-печати в масштабе 1:5. Для каждой лопатки было сделано 3 изображения, между парами которых присутствовали пересечения области отображаемого пространства. Образец исходного изображения представлен на рис. 5. Сдвиг камеры между съёмкой последовательных исходных изображений составлял 10 см. В качестве УПИ использовалась камера технического зрения Imrex В1921 [9].

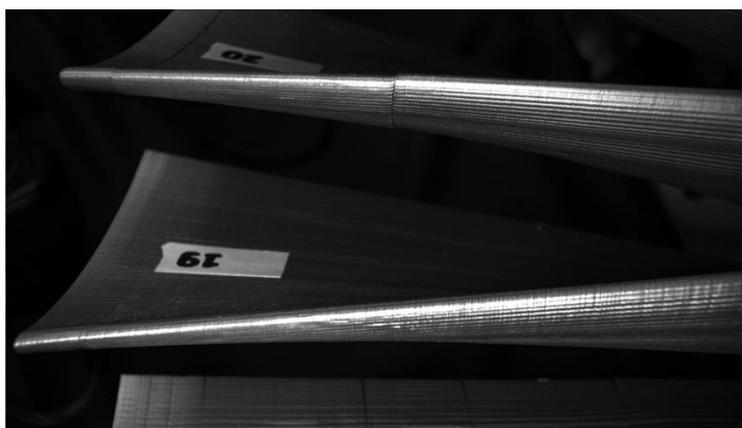


Рис. 5. Образец исходного изображения

К наборам исходных изображений, соответствующим конкретным лопаткам, применялись описанные ранее алгоритмы. Опорные точки выбирались как вручную (рис. 6), так и автоматически (рис. 7). На представленных изображениях (рис. 6, рис. 7) изображение  $I_1$  помещено в красный канал,  $I_2$  – в зеленый,  $I_3$  – в синий.

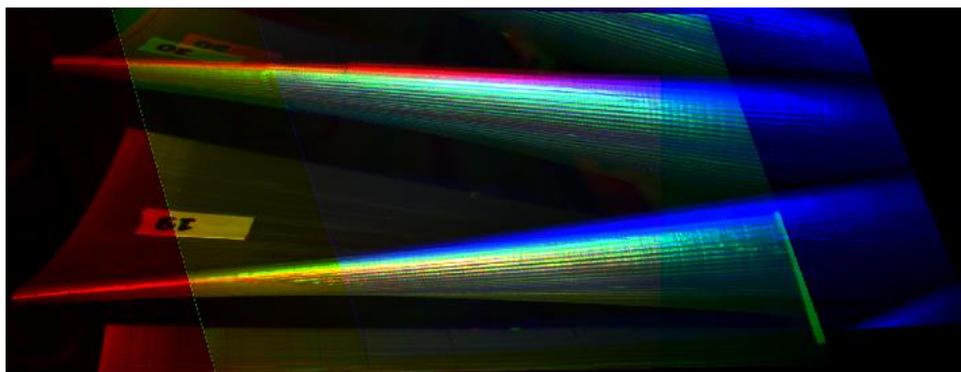


Рис. 6. Результаты комплексирования (выбор опорных точек вручную)

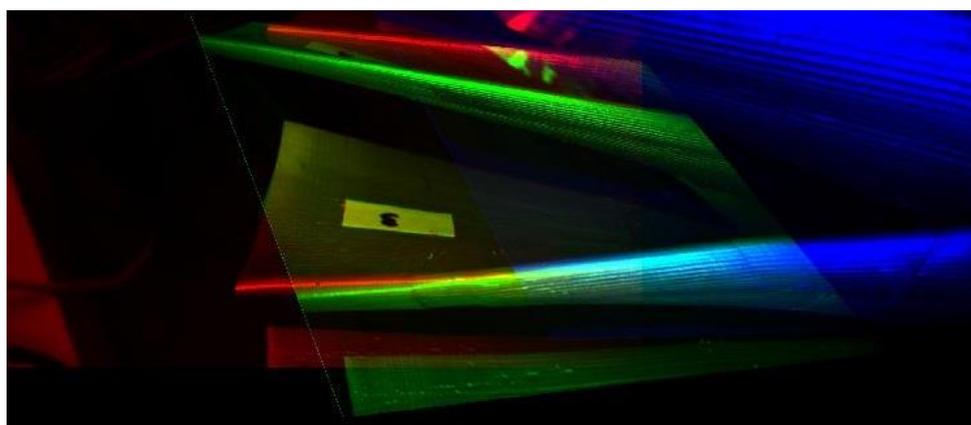


Рис. 7. Результаты комплексирования (выбор опорных точек автоматически)

### **Выводы и комментарии**

На изображении, полученном в результате выбора опорных точек вручную (рис. 7), заметно рассогласование изображений на соседних лопатках. Это обусловлено влиянием параллакса (угловое перемещение удаленных на разное расстояние точек пространства в поле зрения УПИ будет различным) и дисторсии камеры. Рассогласование на рис. 6 также во многом вызвано параллаксом: при перемещении УПИ, различные участки изображения будут претерпевать изменения. В результате опорные точки пространства теряют свои примечательные особенности на одном из изображений, а их дескрипторы могут сильно различаться.

Несмотря на очевидные неточности пространственного совмещения экспериментальных изображений, имеет смысл продолжить исследования в данном направлении, совершенствуя, обновляя и адаптируя использованный набор алгоритмов.

**Направления дальнейших исследований.** Следует проверить качество изображений повторно, уменьшив влияние дисторсии путём калибровки УПИ. Следующим шагом является разработка алгоритмов определения геометрических параметров лопаток по полученным изображениям. Также необходимо сформировать критерии оценки качества комплекслируемых изображений, определяющие их пригодность для определения геометрических параметров лопаток.

### **Литература**

1. Lyu W., Zhou Z., Chen L., Zhou Y. A survey on image and video stitching // Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2018. 30 p. DOI: 10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0008.

2. Akhmerov A.K., Vasilev A.S., Vasileva A.V. Research of spatial alignment techniques for multimodal image fusion // Proceedings of SPIE - 2019, Vol. 11059, pp. 1105916. DOI: 10.1117/12.2526030.
3. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool, L. SURF: Speeded Up Robust Features // ETH Zurich, Katholieke Universiteit Leuven (2006).
4. Detect SURF Features [Электронный источник] // Matlab R2019b documentation. MathWorks, 2020. URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/detectsurffeatures.html> (Дата обращения: 20.01.2020).
5. Feature Detection and Description [Электронный источник] // OpenCV 2.4.13.7 documentation. Opencv dev team, 2019. URL: [https://docs.opencv.org/2.4/modules/nonfree/doc/feature\\_detection.html](https://docs.opencv.org/2.4/modules/nonfree/doc/feature_detection.html) (Дата обращения: 15.12.2019).
6. Chui C. An Introduction to Wavelets // Academic Press, San Diego. 1992. 73 p. ISBN 0-585-47090-1.
7. Компьютерное зрение. Современный подход // Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2004. 928 с. ISBN 5-8459-0542-7.
8. Lecture 16: Planar Homographies [Электронный источник] // Robert Collins CSE486, Penn State. URL: <http://www.cse.psu.edu/~rtc12/CSE486/lecture16.pdf> (Дата обращения: 10.12.2019).
9. B1921 2MP CCD Camera [Электронный источник] // IMPERX, 2017. URL: <https://www.imperx.com/ccd-cameras/b1921/> (Дата обращения: 28.11.2019).



**Бененсон Екатерина Александровна**

Год рождения: 1998  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы №В3405,  
направление подготовки: 12.03.02 – Опотехника,  
e-mail: ekaterina.benenson@gmail.com



**Коняхин Игорь Алексеевич**

Год рождения: 1953  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,  
e-mail: iakoniakhin@itmo.ru

УДК 531.749.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА  
ДЛЯ ТРЁХКООРДИНАТНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Е.А. Бененсон**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор И.А. Коняхин**

**Аннотация**

Во многих практических задачах требуется определение пространственного поворота объекта контроля, что определяет необходимость трёхкоординатных угловых измерений. Из-за инвариантности к углу скручивания используемого в серийных автоколлиматорах плоского зеркала, при необходимости контроля угловых перемещений по трём углам, появляется потребность в более сложном отражателе. В настоящей работе исследован специальный отражатель, позволяющий контролировать коллимационные углы и угол скручивания [1].

**Ключевые слова**

Автоколлиматор, измерение угла скручивания, пирамидальная призма, исследование.

Исследуемый отражатель представляет собой четырёхгранную пирамиду и является усовершенствованным вариантом пирамидального отражателя, образованного в результате пересечения двух призм с ортогональными ребрами и углом между отражающими гранями, равным  $60^\circ$ . В усовершенствованном отражателе двугранный угол между отражающими гранями одной образующей призмы равен  $54^\circ 43'$  (рис 1 (а)), величина двугранного угла ортогональной образующей призмы равен  $54^\circ 37'$  (рис. 1 (б)).

Такое отклонение обеспечивает чувствительность контрольного элемента к поворотам относительно трех координатных осей. Ход лучей в призме с двугранным углом  $60^\circ$  и в исследуемой призме определяется тремя последовательными

отражениями от граней, соответственно, от первой грани по ходу луча, затем – от второй и далее – вновь от первой – см. рис. 2 (а) и (б) соответственно.

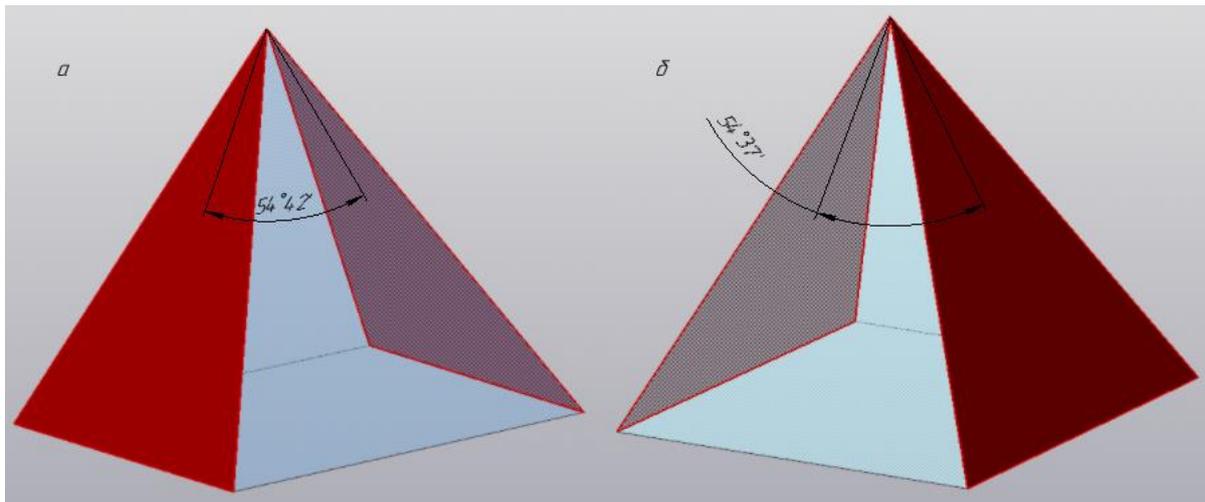


Рис. 1. Двугранный угол в исследуемой призме в одной плоскости (а) и в ортогональной плоскости (б)

Действие отражателя было исследовано матричным методом, который описывает орт **B** отражённого пучка следующим выражением:

$$B = M_r \cdot M \cdot M_r^T \cdot \bar{A} \quad (1)$$

где  $M$  – матрица действия зеркально-призменной системы;  $\bar{A}$  – орт падающего на отражатель луча,  $A = [0,0,-1]^T$ ;  $M_r$  - обобщённая матрица преобразования координат,  $M_r^T$  - транспонированная матрица преобразования координат [2].

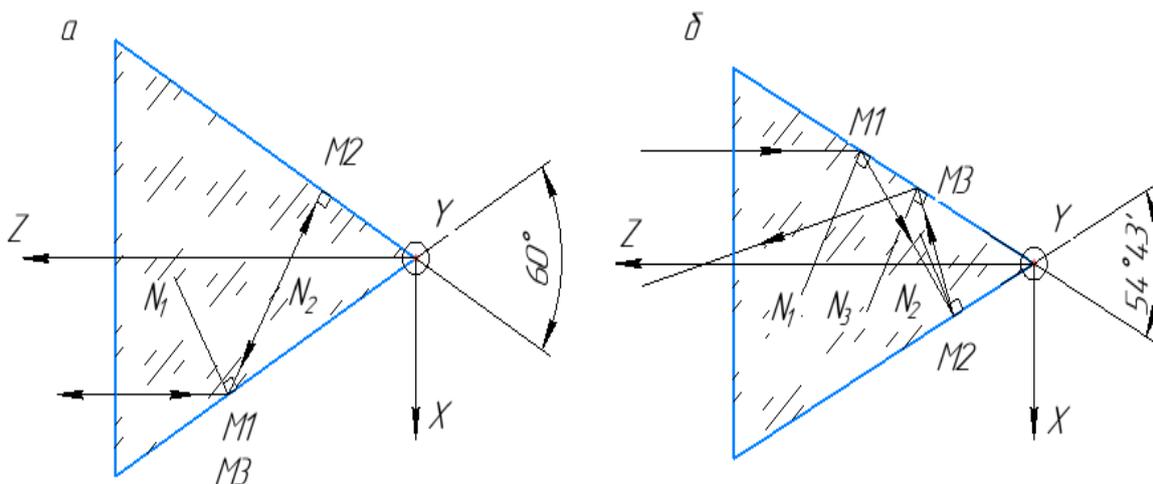


Рис. 2. Ход лучей в призме с двугранным углом 60° (а) и исследуемой призме (б)

С помощью вычислительной среды Mathcad была получена общая матрица поворота следующего вида:

$$M_r = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \\ \cos \theta_1 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2 & \cos \theta_3 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы поворота зеркально-призменной системы относительно осей, ортогональных оптической оси объектива автоколлиматора (коллимационные оси),  $\theta_3$  – угол поворота относительно оптической оси объектива автоколлиматора (угол скручивания).

Матрица действия  $M$  (далее  $M_{\pi/6}$ ) для исходной конфигурации отражателя с двугранным углом  $60^\circ$  выглядит следующим образом:

$$M_{\pi/6} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/6) & 0 & -\sin(\pi/6) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\pi/6) & 0 & -\cos(\pi/6) \end{bmatrix} \quad (3)$$

У исследуемого отражателя двугранный угол призмы имеет величину  $(\pi/6 + \varphi)$ , где  $\varphi$  – разница между двугранным углом в призме исходной конфигурации ( $60^\circ$ ) и двугранным углом в исследуемой призме. Для одного из двугранных углов  $\varphi = -5^\circ 17'$ .

Матрица  $M_{\pi/6+\varphi}$  исследуемого отражателя представляет собой произведение трёх матриц, описывающих последовательные отражения в призме. Поскольку грани призмы являются плоскими зеркалами, каждое отражение можно описать матрицей:

$$M' = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_x N_y & -2N_x N_z \\ -2N_x N_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_y N_z \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  – координаты орта нормали к отражающей поверхности в системе координат XYZ отражателя.

При первом отражении нормаль  $N_1$  к первой грани имеет координаты:

$$N_1 = \begin{bmatrix} -\cos(\pi/6 + \varphi) \\ 0 \\ \sin(\pi/6 + \varphi) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При втором отражении нормаль  $N_2$  ко второй грани имеет координаты:

$$N_2 = \begin{bmatrix} \cos(\pi/6 + \varphi) \\ 0 \\ \sin(\pi/6 + \varphi) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Третье отражение происходит вновь от первой грани, поэтому  $N_3 = N_1$ .

В результате перемножения трёх матриц вида (4) с координатами нормалей, описанных выражениями (5), (6) получена матрица исследуемого отражателя следующего вида:

$$M_{\pi/6+\varphi} = \begin{bmatrix} \cos(6\varphi) & 0 & -\sin(6\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(6\varphi) & 0 & -\cos(6\varphi) \end{bmatrix} \quad (7)$$

При подстановке полученных матриц (2) и (7) в формулу (1) для малых величин измеряемых углов определяется орт **B** отраженного пучка:

$$B = \begin{bmatrix} \sin(6\varphi) + \theta_2 \cos(6\varphi) + \theta_2 (\cos(6\varphi) - \theta_2 \sin(6\varphi)) + \theta_1 \theta_3 \\ \theta_3 \sin(6\varphi) - \theta_1 \cos(6\varphi) - \theta_1 + \theta_2 (\theta_3 \cos(6\varphi) + \theta_1 \sin(6\varphi)) \\ \cos(6\varphi) - \theta_1^2 - \theta_2 \sin(6\varphi) - \theta_2 (\sin(6\varphi) + \theta_2 \cos(6\varphi)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что составляющие орта отражённого пучка определяются всеми углами  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  поворота, что подтверждает возможность измерения угла скручивания наряду с измерением коллимационных углов.

Матрица чувствительности контрольного элемента к углу скручивания  $\theta_3$  определяется как

$$M_{\pi/6+\varphi} \cdot \bar{A} = \begin{bmatrix} \cos(6\varphi) & 0 & -\sin(6\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(6\varphi) & 0 & -\cos(6\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(6\varphi) \\ 0 \\ \cos(6\varphi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

По выражению (9) чувствительность к углу  $\theta_3$  пропорциональна малой величине  $\sin(6\varphi)$ , что определяет возможность использования автоколлиматора как индикатора наличия угла скручивания. Высокая чувствительность измерения возможна при введении в схему измерения дополнительного приёмного канала.

### Выводы

В результате исследования была подтверждена возможность пространственных угловых измерений при использовании автоколлиматором предложенного контрольного элемента. Исследование контрольного элемента матричным методом показало недостаточную для измерения угла скручивания чувствительность при наличии одного приемного канала. Этот недостаток может быть скомпенсирован изменением схемы автоколлиматора – созданием дополнительных приемных каналов.

### Литература

1. Юстировка оптических приборов. Погарев Г.В., изд-во «Машиностроение», 1968. 292 стр.
2. Коняхин И.А., Моисеева А.А., Хоанг Ван Фонг Оптико-электронный автоколлиматор для двухкоординатных угловых измерений // Приборостроение. 2016. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optiko-elektronnyy-avtokollimator-dlya-dvuhkoordinatnyh-uglovyh-izmereniy> (дата обращения: 20.02.2020).



**Бокатый Илья Олегович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,  
направление подготовки: 05.11.07 – Оптические  
и оптико-электронные приборы и комплексы,  
e-mail: bokatyi.ilia@bk.ru



**Коротаев Валерий Викторович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,  
e-mail: vvkorotaev@itmo.ru



**Рыжова Виктория Александровна**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., доцент,  
e-mail: victoria\_ryz@mail.ru



**Денисов Виктор Маевич**  
ООО «ФлагманГео»,  
д.т.н.,  
e-mail: 070255@gmail.com

УДК 59.14.27

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ  
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ**

**И.О. Бокатый, В.М. Денисов, В.А. Рыжова**  
**Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Коротаев**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

В работе представлен анализ сцинтилляционных гамма-спектрометров построенных на базе кремниевых фотоэлектронных умножителей. Рассмотрены области применения

полевых гамма-спектрометров и выделены основные требования, которым должны соответствовать приборы. Описаны базовые принципы разработки полевых сцинтилляционных гамма-спектрометров, принимающие во внимание процессы и преобразования излучения оптического диапазона.

#### **Ключевые слова**

Полевой гамма-спектрометр, сцинтиллятор, световод, кремниевый фотоэлектронный умножитель, SiPM.

В настоящее время спектральные методы обнаружения и анализа источников ионизирующих излучений широко применяются во многих областях науки и техники. Экология, геология и минералогия, металлургия и химическая индустрия, нефтяная и пищевая промышленность, медицина – вот далеко не весь перечень сфер, где гамма-спектрометр выступает как самостоятельное программно-аппаратное средство. Сцинтилляционные спектрометры применяются для контроля радиационной обстановки, поиска источников ионизирующего излучения, томографии и много другого. Однако, в подавляющем большинстве случаев серийных приборов в основе конструкции лежит вакуумный фотоэлектронный умножитель (ВФЭУ), что усложняет использование прибора в полевых условиях. В данной статье под полевым использованием прибора понимается любое использование вне лабораторных условий.

Целью данной работы является обзор существующих технических решений в области полевой гамма-спектрометрии и последующее определение актуальных измерительных характеристик, которыми должен обладать разрабатываемый прибор.

Гамма-спектрометры являются одним из наиболее распространённых средств неразрушающего контроля радиоактивных материалов, благодаря возможности изотопного анализа образцов, содержащих сложную смесь радионуклидов, и возможности количественного описания их активности и массы.

По принципу регистрации ионизирующего излучения гамма-спектрометры можно разделить на: твердотельные, магнитные, газонаполненные и сцинтилляционные детекторы. Типичным примером твердотельных детекторов являются приборы на основе полупроводниковых материалов – чаще германия или кремния [1]. С помощью приборов данного класса возможно получение энергетических спектров с высоким разрешением (порядка долей процента полной ширины на уровне половинной амплитуды [2]. Однако, работа таких детекторов должна сопровождаться охлаждением в криостатах до температуры жидкого азота. Поэтому, твердотельные спектрометры сложно применимы в полевых условиях. Так же стоит отметить, что цена детектора на основе высокоочищенного германия (HPGe) будет на порядок больше, чем цена полевого сцинтилляционного детектора.

Принципиально отличным классом являются сцинтилляционные детекторы, в которых ионизирующее излучение взаимодействует со сцинтилляционным кристаллом, переводя атомы кристалла в возбужденное состояние. Возвращаясь в основное состояние, атомы сцинтиллятора испускают фотоны оптического диапазона, которые регистрируются фотоприёмником. Особенностью сцинтилляционного метода является высокая эффективность регистрации гамма-квантов (до 100%) и низкая энергетическая разрешающая способность (>10%) [3]. Более того, данный метод регистрации ионизирующего излучения позволяет создавать мобильные приборы для полевого использования.

Долгое время в качестве фотоприёмника в таких системах использовался ВФЭУ. Обладая высокой чувствительностью и малой инерционностью, ВФЭУ позволил создавать точную аппаратуру [4] для регистрации и анализа быстропротекающих процессов. Однако ВФЭУ обладает рядом недостатков, затрудняющих использование приборов на его основе, особенно в полевых условиях. ВФЭУ состоит из фотокатода,

системы динодов и анода в вакуумной трубке, поэтому прибор обладает низкой стойкостью к механическим воздействиям и высокими массогабаритными характеристиками. Другим негативным фактором является потребность в высоковольтном источнике питания для создания высокого потенциала на ускоряющих динодах. Источник высокого напряжения обладает большими размерами и вносит существенные помехи в измерения ВФЭУ [5].

Современные требования к приборам вызывают необходимость в разработке для них качественно новых детекторов, обеспечивающих минимальные массогабаритные характеристики, высокий уровень автоматизации, многоканальность, реализацию беспроводной связи и возможности интеграции в большие системы [6-9]. Развитие производства твердотельных фотоэлектронных приёмников сделало кремниевые фотоэлектронные умножители (SiPM) коммерчески доступным вариантом чувствительного элемента в приборах сцинтилляционной спектрометрии. Стоит отметить, что помимо принципиально нового механизма регистрации потока оптического излучения, SiPM лишены недостатков вакуумных аналогов.

Несмотря на значительные преимущества, на мировом рынке практически нет серийных сцинтилляционных гамма-спектрометров на базе SiPM, однако имеется большое количество экспериментальных образцов приборов. В таблице приведены примеры исполнений сцинтилляционных детекторов.

Таблица

### Примеры исполнения гамма-спектрометров на основе SiPM

Ссылка	Применение	Кристалл, габариты (мм×мм×мм)	Приёмник, габариты (мм×мм)	Световод Форма, длина	Параметры	
					Разрешение <sup>137</sup> Cs, %	Линейность как R <sup>2</sup>
[7]	Личный мониторинг	Ce:GAGG, 3×3×20	Hamamatsu, 3×3	No	5.8	0.9924
[8]	Экспериментальный стенд	NaI(Tl), ø25×25	SensL MicroFC, 12×12	Conoid, 10	7.7	NA
[8]	Экспериментальный стенд	NaI(Tl), Ø50×50	SensL MicroFC, 12×12	Conoid, 10	10.2	NA
[9]	Стенд для экспериментов в ядерной физике	LaBr3:Ce, Ø25×25	FBK (NUV-HD), 31.9×38.9 (per 6×6 mm active area)	No	3.7	NA
[10]	Экспериментальный стенд	CsI(Tl), 6×6×10	SensL, 6×6	No	7.9	На графике
[11]	Стенд для радиационного мониторинга	NaI(Tl), Ø50×50	SensL ArrayJ, 12×12	No	9.8	На графике в статье
[11]	Стенд для радиационного мониторинга	NaI(Tl), Ø50×50	SensL ArrayJ, 12×12	Conoid, 10	11.3	На графике в статье
[11]	Стенд для радиационного мониторинга	NaI(Tl), Ø50×50	SensL ArrayJ, 12×12	Conoid, 30	11.8	На графике в статье
[12]	Экспериментальный стенд	CLYC,	Hamamatsu, 6×6	No	8.3	0.994

В таблице приведен обзор наиболее показательных примеров реализации сцинтилляционного гамма-спектрометра на основе SiPM. Стоит отметить общий интерес к созданию недорогой, компактной, беспроводной системы, осуществляющей измерения в режиме реального времени [10, 13]. Во всех представленных работах (кроме первой) выходная грань сцинтилляционного кристалла больше, чем площадь детектирования в SiPM. Основным влияющим фактором на энергетическое разрешение является материал сцинтилляционного кристалла. В случае, указанном в источнике [11, 12] стоит отметить незначительные ухудшения энергетического разрешения при включении в систему световодов. Подавляющее большинство статей, представленных по теме сцинтилляционной гамма-спектрометрии, направлены на сферу регистрации и контроля ионизирующего излучения, что подчёркивает важность создания качественно новых детекторов для решения задач в этой области. Далее приведены эксплуатационные характеристики к полевому гамма-спектрометру, удовлетворяющие актуальные запросы на данный класс измерительных приборов:

1. Диапазон регистрируемых энергий от 10 кэВ до 3000 кэВ.
2. Максимальная статистическая нагрузка не менее 100000 импульсов в секунду.
3. Погрешность измерения средней скорости счета гамма-квантов не более 8%.
4. Интегральная нелинейность передаточной характеристики  $\pm 0,2\%$ .
5. Линейность передаточной характеристики не менее 1%.
6. Время непрерывной работы: не менее 16 часов.
7. Масса прибора в рабочем состоянии - не более 2 кг.

Представленные характеристики являются достижимыми при использовании SiPM вместо вакуумного фотоэлектронного умножителя.

Одно из исполнений сцинтилляционного детектора для использования в автономном стационарном режиме в полевых условиях представлено на рис. 1. На рисунке цифрами обозначены основные элементы конструкции: 1 – кожух приёмной системы; 2 – сцинтилляционный кристалл; 3 – матрица КФЭУ с контактами для пайки; 4 – электронная плата обработки сигнала; 5 – герметичный разъём DH24-usb2.0-s02; 6 – герметичный корпус прибора с крышкой.

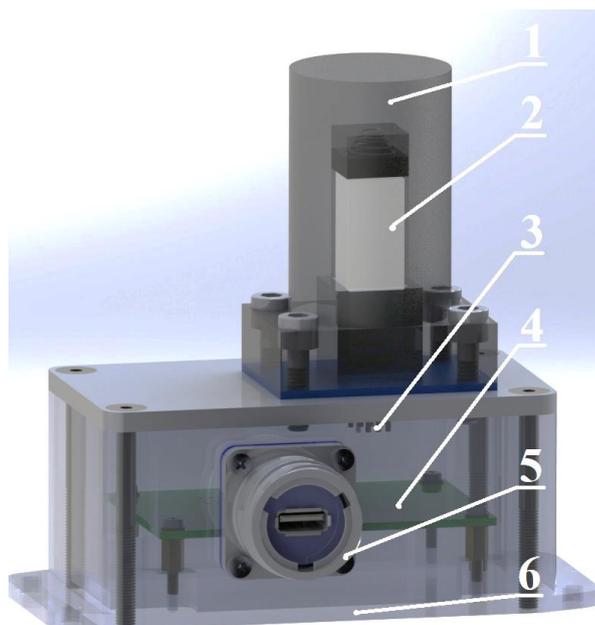


Рис. 1. Модель сцинтилляционного детектора полевого гамма-спектрометра

Герметичный корпус прибора с крышкой является стандартным корпусом для радиоэлектронной аппаратуры фирмы «Gainta» с прорезанными отверстиями под выходы приёмного блока и герметичного разъёма, а также отверстиями с резьбой для их крепежа.

Процесс сборки приёмной части детектора осуществляется по принципу насыпной оптической системы и соответствует модели, представленной на рис. 2. В кожух (1), изготовленный из капролона, последовательно устанавливаются прижимная пружина (2), капролоновая прокладка (3), сцинтилляционный кристалл, упакованный в ленту (4), отражательная система из четырёх отдельных зеркал (5), плата КФЭУ (6). Кожух, укомплектованный всеми элементами, прикручивается четырьмя винтами с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником (8) к незакреплённой крышке корпуса через резиновую прокладку (7).

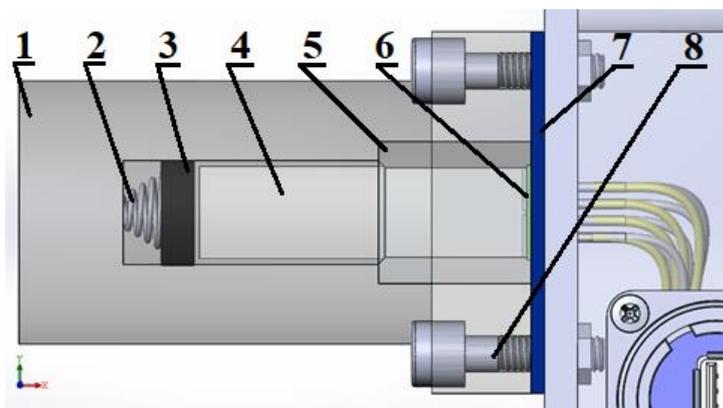


Рис. 2. Модель приёмного блока детектора

Электронная плата обработки сигнала фиксируется в стандартных отверстиях корпуса с помощью латунных стоек для плат 8 мм x М3, шайб и винтов. Контакт разъёма и платы обработки осуществляется путём прямой спайки за счёт изогнутой формы выходных контактов разъёма и отверстий под пайку в плате обработки. Контакт платы КФЭУ и электронной платы обработки сигнала осуществляется за счёт проводов диаметром 1,4 мм, закреплённых пайкой к отверстиям в плате обработки и пайкой через наконечники штыревые втулочные НШВ 1.0-8 к контактам платы КФЭУ.

После завершения пайки крышка с приёмной системой устанавливается на корпус и фиксируется с помощью винтов оцинкованных потайных М5 x 55 мм.

В данной работе представлен обзор наиболее релевантных сцинтилляционных реализаций гамма-спектрометров на основе SiPM для задач гамма-спектрометрии. Определены эксплуатационные характеристики, которым должен соответствовать разрабатываемый прибор.

## Литература

1. Wallbrink P.J., Walling D.E., and Q. He. "Radionuclide measurement using HPGe gamma spectrometry." Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides. Springer, Dordrecht. 67-96 (2002).
2. Описание типа измерения «Гамма-спектрометр на основе детектора из высокочистого германия с электромеханическим охлаждением РКГ-1», приложение к свидетельству № 55340 об утверждении типа средств измерений (2014 г.).
3. Siegbahn K., ed. [Alpha-, Beta, and Gamma-Ray Spectroscopy], North-Holland Publ., Amsterdam, p. 1639. 1965.

4. Анисимова И.И., Глуховской Б.М. [Фотоэлектронные умножители]. Сов. Радио, Москва. 1974.
5. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. [Вакуумные фотоэлектронные устройства]. Энергия. Москва. 1976.
6. Denisov V.M., Korotaev V.V., Titov A.B., Blokhina A.A., Kleshchenok M.A., "Overview of field gamma spectrometries based on Si-photomultiplier" Proceedings of SPIE. № Vol. 10231. 2017.
7. Park, Hye Min, and Koan Sik Joo. "Development and performance characteristics of personal gamma spectrometer for radiation monitoring applications." Sensors 16.6: 919, (2016).
8. Huang Tuchen, et al. "NaI (Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 851: 118-124, 2017.
9. Cozzi Giulia, et al. "High-Resolution Gamma-Ray Spectroscopy With a SiPM-Based Detection Module for 1" and 2" LaBr 3: Ce Readout." IEEE Transactions on Nuclear Science 65.1, 645-655. 2017.
10. Becker, Eric M., et al. "Small prototype gamma spectrometer using CsI (Tl) scintillator coupled to a solid-state photomultiplier." IEEE Transactions on Nuclear Science 60.2, 968-972. 2013.
11. Kim Junhyeok, et al. "Efficient design of a  $\varnothing 2 \times 2$  inch NaI (Tl) scintillation detector coupled with a SiPM in an aquatic environment." Nuclear Engineering and Technology 51.4, 1091-1097. 2019.
12. Mesick Katherine E., et al. "Performance of several solid state photomultipliers with CLYC scintillator." 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). IEEE. 2015.
13. David S., and Kandarakis I. "Development of a Submillimeter Portable Gamma-Ray Imaging Detector, Based on a GAGG: Ce – Silicon Photomultiplier Array." International Conference on Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies. Springer, Cham. 2018.



**Булыга Дмитрий Владимирович**

Год рождения: 1999

Университет ИТМО,  
факультет фотоники и оптоинформатики,  
студент группы № V3327,

направление подготовки: 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика,  
e-mail: dmbulyga@yandex.ru



**Лебедев Вячеслав Федорович**

Год рождения: 1957

Университет ИТМО,  
факультет фотоники и оптоинформатики,  
к.т.н.,

e-mail: lebedevvf@mail.ru

УДК 543.423.1, 543.423.3

## **АНАЛИЗ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА СИНТЕТИЧЕСКИХ НРНТ АЛМАЗОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Д.В. Булыга, В.Ф. Лебедев**

**Научный руководитель – к.т.н., В.Ф. Лебедев**

### **Аннотация**

Проведено исследование примесного состава многосекторных азот- и борсодержащих НРНТ алмазов методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. Показано, что вхождение в структуру алмаза таких примесей, как кислород и водород, существенно зависит от кристаллографической ориентации сектора роста, а также от типа алмаза, который определяется видом и концентрацией легирующего элемента.

### **Ключевые слова**

Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, синтетические алмазы, графитизация, НРНТ алмазы.

Для алмаза характерны уникальные физические свойства – высокая твердость и теплопроводность, широкий спектральный диапазон прозрачности, а также высокая эффективность ВКР-преобразования, что определяет возможность его применения в качестве абразивного, высокотеплопроводящего материала, в качестве активной среды ВКР-лазера, материала нанопотоники. Метод НРНТ (high pressure – high temperature) является одним из наиболее распространенных методов выращивания синтетических алмазов, который позволяет выращивать крупные высококачественные монокристаллические алмазы, для которых характерна выраженная секторная структура [1]. Наличие тех или иных секторов роста зависит от формы затравки и вида катализатора, используемого в процессе роста кристалла. Легирование алмаза бором и

азотом существенно влияет на его теплопроводность и электропроводность, поэтому легированные синтетические алмазы, обладающие полупроводниковыми свойствами, представляют интерес для электроники. Помимо азота и бора влияние на электропроводность и теплопроводность алмазов оказывают такие примеси, как водород и кислород, поэтому при отборе кристаллов, используемых для создания приборов фотоники и электроники, необходима информация о их примесном составе. Ранее в работе [2] проводилось исследование распределения NV-центров в многосекторных НРНТ алмазах, подвергнутых ионной имплантации (He). Для сектора роста (111) наблюдаемая интенсивность люминесценции NV-центров была выше, чем для сектора (100), что свидетельствовало о более высокой (на порядок величины) концентрации азота в секторе (111). Авторами [3] была показана возможность применения лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) и мультивариативного анализа в задаче идентификации места добычи или лаборатории роста алмазов. Однако такой подход не позволяет получить информацию о примесном составе исследуемых образцов. Основанный на методе ЛИЭС и предлагаемый в настоящей работе подход заключается в сравнении вкладов атомарных полос излучения примесей в спектр излучения лазерно-индуцированной плазмы. Преимущество метода ЛИЭС заключается в его высокой чувствительности при анализе концентрации примесей в исследуемом материале (на ppm уровне), а анализ молекулярных полос излучения в спектре плазмы исследуемого материала позволяет получить некоторую информацию и о структуре примесных центров.

Схема измерений методом ЛИЭС представлена на рис. 1. Под действием излучения импульсного лазера (1), сфокусированного линзой (2) на поверхности исследуемого образца, часть вещества переводится в состояние плазмы. Спектр излучения полученной плазмы регистрируется волоконным спектрометром (6). Синхронизация работы спектрометра и лазера осуществлялась посредством подачи на запуск лазера управляющего TTL-сигнала со спектрометра, что позволяло изменять временную задержку между моментом взаимодействия лазерного импульса с поверхностью образца и моментом открытия измерительного тракта спектрометра и которая является ключевым параметром при проведении эксперимента. Для предотвращения взаимодействия факела плазмы с кислородом и азотом воздуха образцы обдувались низкоскоростной струей аргона.

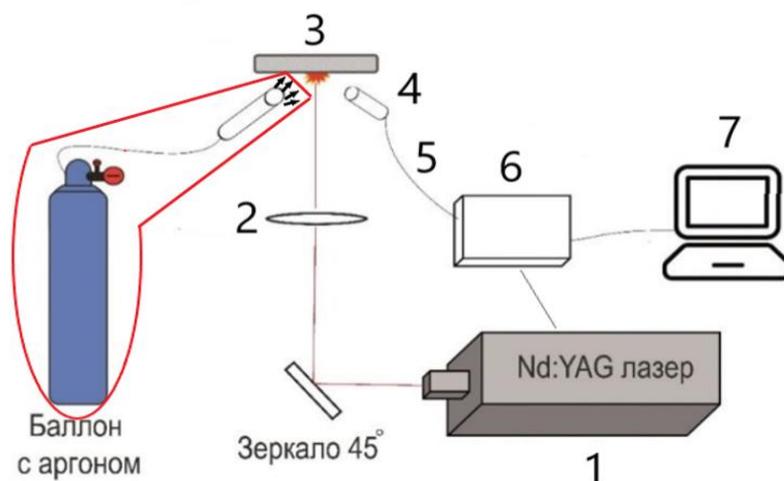


Рис. 1. Принципиальная схема ЛИЭС-системы, где:  
1 – Nd:YAG-лазер, 2 и 4 – фокусирующие системы,  
3 – моторизованная подвижка с образцами,  
5 – оптическое волокно, 6 – спектрометр, 7 – компьютер

В начальные моменты времени после возникновения лазерной плазмы в ее спектре преобладает тепловое излучение. Однако при увеличении задержки открытия спектрометра в регистрируемом спектре начинают преобладать узкие спектральные линии, соответствующие определенным химическим элементам или структурным группам, которые несут в себе информацию о химическом составе исследуемого вещества.

Для проведения исследования компанией «Нью Даймонд Технолоджи» были предоставлены многосекторные пластины НРНТ алмазов размером около  $5 \times 5 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>, легированные азотом (10 и 100 ppm) и бором (0,5 ppm). Фотографии образцов показаны на рис. 2. В ходе проведения экспериментов использовался импульсный Nd:YAG лазер с длиной волны 1064 нм и энергией импульса около 1 кДж/см<sup>2</sup>. При исследовании образцов небольшого размера необходимо осуществлять их точное позиционирование относительно лазерного луча, а также реализовать возможность сканирования поверхности образца в режиме автоматизированного измерения спектров плазмы. С этой целью было разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять автоматическое управление подвижкой, на которой закреплен образец, лазером и спектрометром. Также в программе был реализован модуль обработки полученных спектров, в частности, с применением процедур нормализации и вычитания базовой линии.

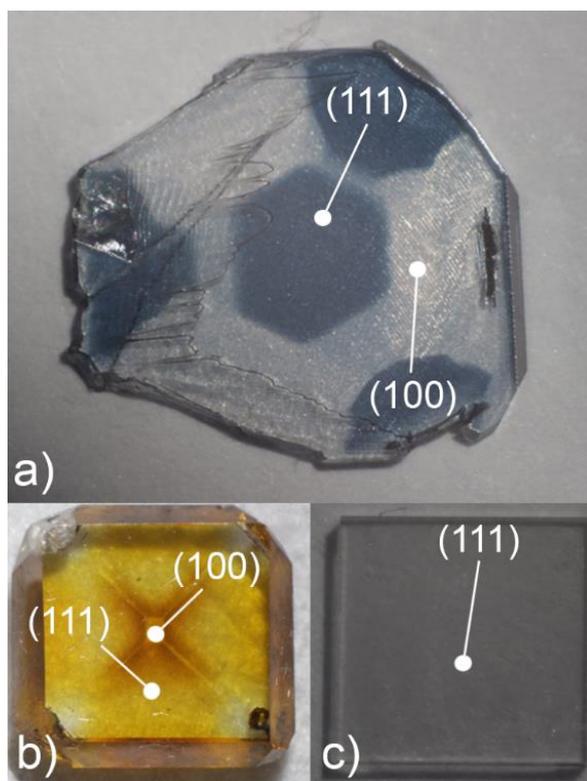


Рис. 2. Внешний вид многосекторных пластин НРНТ алмазов: а) алмаз, легированный бором (0,5 ppm); б) алмаз, легированный азотом (100 ppm); в) алмаз, легированный азотом (10 ppm)

В ходе проведения экспериментов наблюдалось явление лазерно-индуцированной графитизации поверхности исследуемых образцов [4, 5] – после воздействия на образец последовательности нескольких лазерных импульсов наблюдалось характерное почернение поверхности, которое сопровождалось увеличением интенсивности молекулярной полосы  $C_2$  в ЛИЭС-спектрах для первых 10 импульсов. После 10-го импульса наблюдался стационарный режим абляции

поверхности – интенсивность полосы  $C_2$  оставалась постоянной с увеличением номера лазерного импульса. На рис. 3 представлены зависимости интенсивности полосы  $C_2$  от номера лазерного импульса для секторов роста (100) и (111). Скорость роста интенсивности данной полосы характеризует скорость процесса графитизации. Эта величина, а также значения интенсивностей полосы  $C_2$  для первых пяти импульсов достигают наибольших величин для сектора (111) алмаза с концентрацией азота 100 ppm и уменьшаются при снижении концентрации азота до 10 ppm или переходе к сектору (100). Из этого факта можно сделать вывод, что структура сектора (111) более разупорядочена, чем структура сектора (100), так как полоса  $C_2$  характеризует двойные углеродные связи и  $sp^2$ -гибридизованный углерод, в то время как для чистого алмаза характерны одинарные связи и  $sp^3$ -гибридизация атомов углерода. Для алмазов, легированных бором, различия в скорости увеличения интенсивности полосы  $C_2$  менее существенны.

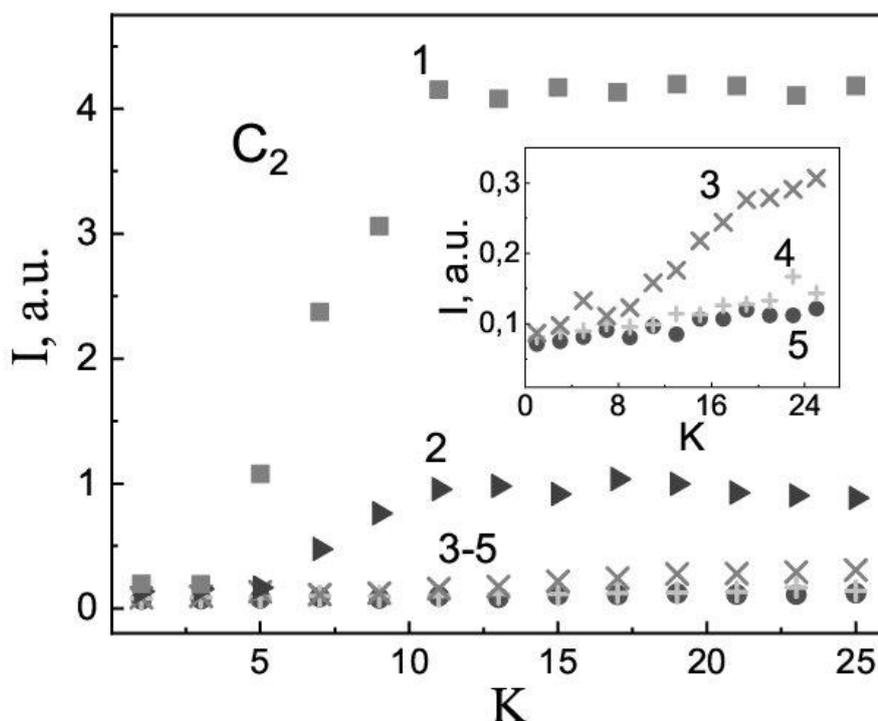


Рис. 3. Зависимости интенсивности ( $I$ ) полосы  $C_2$  от номера лазерного импульса ( $K$ );  
1, 2 – сектора (111) и (100) соответственно алмаза с концентрацией азота 100 ppm;  
3 – сектор (111) алмаза с концентрацией азота 10 ppm; 4, 5 – сектора (100) и (111)  
соответственно алмаза с концентрацией бора 0.5 ppm

Интенсивности излучения атомарных полос водорода и кислорода также различаются для различных секторов роста алмазов, легированных бором и азотом (рис. 4, рис. 5). Обнаружено, что в процессе воздействия на образцы первыми десятью импульсами интенсивность полосы излучения водорода уменьшается, что может быть связано с наличием слабосвязанных или адсорбированных примесей этого элемента в структуре алмаза. Значения интенсивностей полос и водорода, и кислорода после десяти импульсов зависят от вида легирующего элемента, его концентрации и кристаллографической ориентации сектора роста алмаза, и достигают наибольшего значения для сектора (111), что может быть связано с увеличением вхождения примесей в данный сектор в связи с большей разупорядоченностью углеродных связей.

Для полосы излучения кислорода наблюдаются схожие зависимости, однако вхождение кислорода в структуру алмазов, легированных бором, меньше, чем в структуру алмазов, легированных азотом.

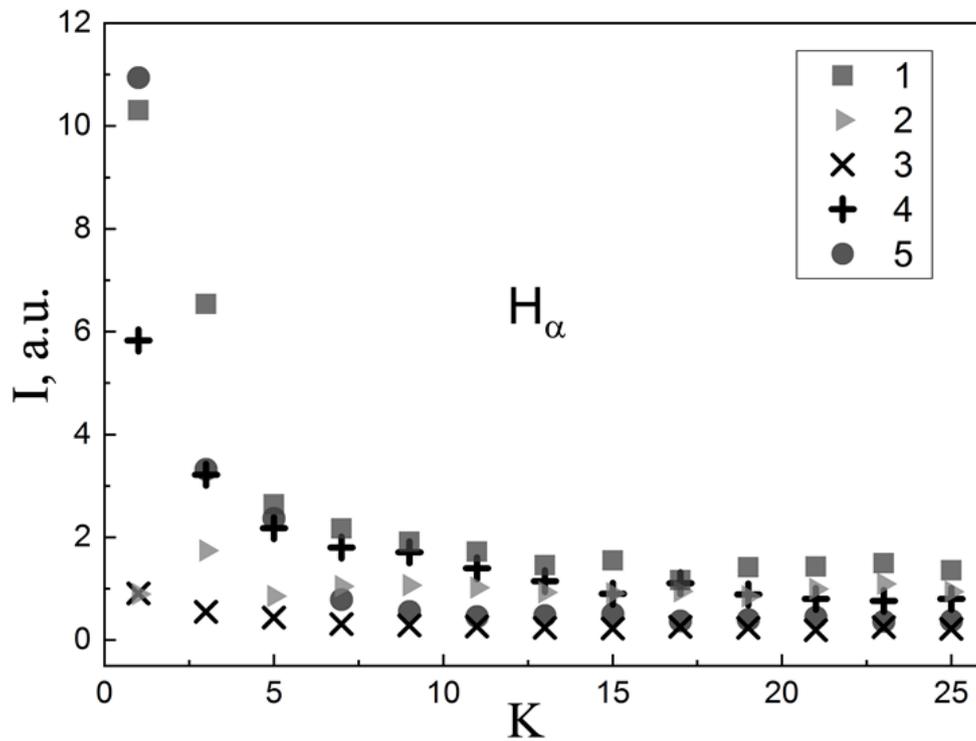


Рис. 4. Зависимость интенсивности ( $I$ ) полосы излучения водорода от номера лазерного импульса ( $K$ ), обозначения те же, что и на рис. 3

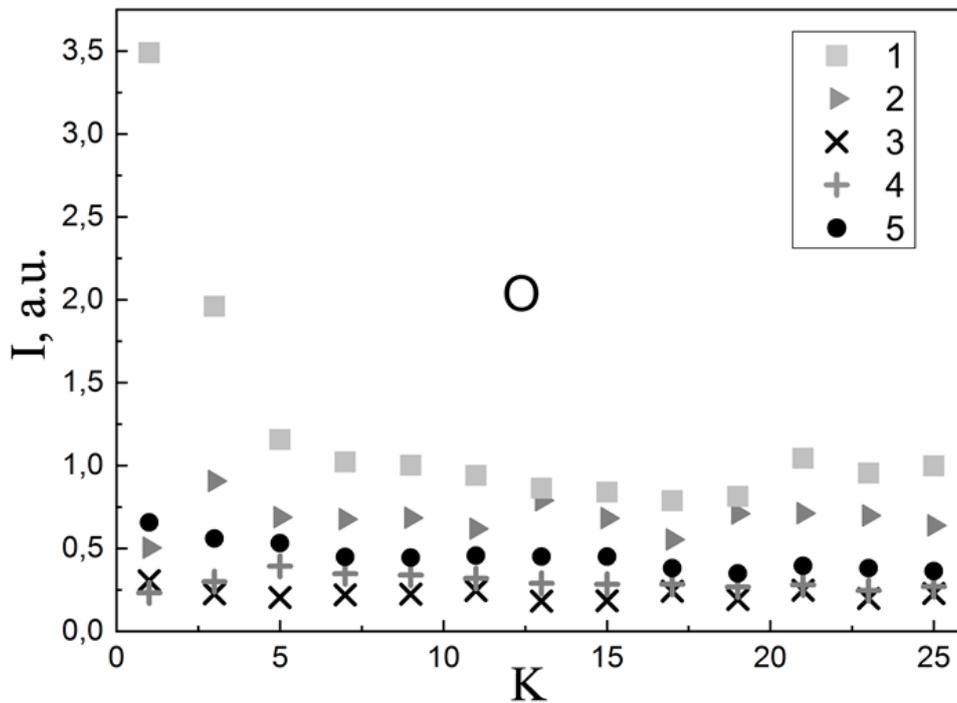


Рис. 5. Зависимость интенсивности ( $I$ ) полосы излучения кислорода от номера лазерного импульса ( $K$ ), обозначения те же, что и на рис. 3

Анализ полученных в ходе проведенного исследования интенсивностей молекулярной полосы  $C_2$  и атомарных полос излучения примесей водорода и кислорода показал, что их значения заметно отличаются для различных секторов роста алмаза и, следовательно, лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия может быть использована для контроля качества алмазов. Метод ЛИЭС также позволяет идентифицировать сектора роста алмазов. Настоящее исследование также показало, что вхождение примесей, а также степень разупорядоченности структуры углеродных связей зависит от кристаллографической ориентации сектора, поэтому возможность идентификации секторов роста может оказаться важной при отборе алмазов, используемых в фотонике и электронике.

Несмотря на то, что ЛИЭС – слаборазрушающий метод, наличие молекулярных полос излучения позволяет исследовать не только химический состав вещества, но и получить некоторое представление о его структуре. Таким образом метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии в ряде случаев является перспективным направлением и для исследований структурных особенностей материалов.

### Литература

1. Klepikov I.V., Koliadin A.V., Vasilev E.A. Analysis of type IIb synthetic diamond using FTIR spectrometry // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Tomsk: Tomsk Polytechnic University. 2017. V. 286.
2. Trofimov S.D., Tarelkin S.A., Bolshedvorskii S.V., Bormashov V.S., Troshchiev S. Yu., Golovanov A.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Boldyrev K.N., Terentiev S.A., Akimov A.V., Kargin N.I., Kukin N.S., Gusev A.S., Shemukhin A.A., Balakshin Yu.V., Buga S.G., Blank V.D. Spatially controlled fabrication of single NV centers in IIa HPHT diamond // Optical Materials Express. 2020. V. 10. №1. P. 198-207.
3. McManus C.E., Dowe J., McMillan N.J. Breakdown Spectroscopy Data to Determine Diamond Provenance // Microsc. Microanal. 2017. V. 23. P. 2282-2283.
4. Konov V. Laser in micro and nanoprocessing of diamond materials // Laser & Photon. Rev. 2012. V. 6. P. 739-766.
5. Лебедев В.Ф., Павлов К.В., Колядин А.В. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия как эффективный метод идентификации алмазов // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. В. 12. С. 1171-1173.



**Быков Дмитрий Иванович**

Год рождения: 1998

Университет ИТМО,

факультет прикладной оптики,

студент группы № В3432,

направление подготовки: 16.03.01 – Техническая физика,

e-mail: dmitrii.bykov@itmo.ru

УДК 535-2

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ АНОМАЛОСКОПА**

**Д.И. Быков**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.В. Бахолдин<sup>1</sup>**

**1 – Университет ИТМО**

**Аннотация**

В данной работе рассматривается создание компьютерной модели аномалоскопа АН-59 в программе «Zemax», проводится анализ энергетических и цветовых характеристик системы для дальнейшего изучения цветового зрения человека. Это позволяет восстановить конструктивные характеристики прибора, а также на основе полученных данных подобрать оптические материалы, необходимые для создания аналога аномалоскопа с учётом всех его режимов работы.

**Ключевые слова**

Аномалоскоп, цветовое зрение, компьютерное моделирование, светофильтры, медицинские приборы.

Современные условия труда требуют высокого уровня физического состояния работников. Цветовое зрение является основополагающим фактором профессиональной пригодности для некоторых специальностей, поэтому существует необходимость создания системы быстрой, точной и унифицированной оценки. С этой целью могут справиться приборы типа «аномалоскоп» [1]. Основной задачей компьютерного моделирования аномалоскопа является возможность восстановления утраченных конструктивных характеристик данного типа приборов ввиду того, что в настоящий момент сохранились действующие образцы, но подробного описания составляющих их компонентов нет.

Работа состоит из нескольких этапов. На первом этапе производится анализ оптической системы аномалоскопа путём исследования существующего образца. В ходе него определяется количество силовых оптических компонентов, их расположение друг относительно друга. Оптическая схема имеет две ветви, одна из которых является эталонной, в ней располагается диск с четырьмя светофильтрами, а другая ветвь управляется наблюдателем во время проведения исследований, в ней располагается револьвер с четырьмя системами фильтров. В обеих ветвях располагаются: две призмы АР-90, 5 двухлинзовых склеенных объективов с задним фокусным расстоянием 125 мм, однолинзовый коллектив, представляющий собой плоско-выпуклую линзу с задним фокусным расстоянием 125 мм, 3 диффузно-рассеивающих экранов, а также общий источник типа «А» [2]. При расчёте конструктивных характеристик объективов и коллектива необходимо учитывать хроматические aberrации и производить расчёт на

их минимумы.

Двухлинзовый склеенный объектив рассчитывается в программе автоматизированного расчёта склеенного компонента по методике Г. Г. Слюсарева [3]. На основе заданных параметров ( $P$  – параметр сферической аберрации,  $W$  – параметр комы и  $C$  – параметр хроматизма) осуществлён подбор материалов, из которого изготовлен объектив и определены конструктивные параметры рабочих поверхностей.

Следующим этапом работы является анализ спектральной зависимости коэффициентов пропускания светофильтров. Для этого используется спектрофотометр, который позволяет получить графическое и числовое представление спектральной зависимости с шагом в 1 нм. В ходе исследования были получены графики зависимостей для каждого из 14 светофильтров. Сравнение кривых спектрального пропускания светофильтров позволило установить идентичность материалов, из которых изготовлены различные пластинки. Так, например, было установлено, что светофильтры, имеющие зелёный цвет и использующиеся в испытаниях «1», «3» и «А» изготовлены из идентичного цветного стекла, синий светофильтр, использующийся в первом испытании идентичен светофильтру из испытания «3», пурпурные светофильтры в первом испытании также являются одинаковыми, сине-зелёные фильтры из первого и второго испытания идентичны, красные во втором и четвёртом испытании также одинаковы. Однако, сравнительный анализ показал, что жёлтый светофильтр из испытания «А», а также синий из второго испытания не имеют аналога по стеклу в системе. Эта идентификация позволяет упростить возможность установления марки оптического цветного стекла, из которого были изготовлены светофильтры, а также перерасчёт на новые марки с учётом современного производства. Сравнение зависимости коэффициента пропускания от длины волны для каждого фильтра с каталогом цветного оптического стекла [4] позволяет предположить, что в системе в качестве зелёных фильтров используется марка ЗС8, синих – СС2, пурпурных – ПС8, сине-зелёных – ЗС11. Остальные образцы не имеют близких аналогов в каталоге. Моделирование всех светофильтров в программе «Zemax» проводится путём задания зависимости коэффициента пропускания от длины волны для каждого светофильтра с шагом в 10 нм. Данные используются из экспериментальных исследований. Это позволяет с достаточно высокой точностью описать кривые пропускания от длины волны, что является важным шагом для воспроизведения всех режимов работы аномалоскопа в дальнейших этапах.

Одним из главных этапов является создание компьютерной модели работы прибора. Для этого был выбран непоследовательный режим трассировки луча, что позволяет учесть явление рассеяния лучей на диффузно-рассеивающих экранах, а также спектральное пропускание всех компонентов. Источник в данной модели является общим для обеих ветвей. Детектор цвета устанавливается в месте расположения глаза наблюдателя. Главной задачей на данном этапе является воссоздание точной картины поля, наблюдаемой в окуляр прибора, исследование цветопередачи системы, а также моделирование различных режимов работы аномалоскопа, для этого обеспечивается сдвиг системы фильтров перпендикулярно оптической оси с точностью одного деления барабанов, расположенных на аномалоскопе АН-59. Для этого вся длина систем светофильтров делится на 71 равный отрезок, что соответствует сдвигу барабана прибора от нуля до семидесяти делений. При этом каждый сдвиг вводит в пучок света часть фильтра, отличающегося по цвету от того, что используется в «эталонной» правой ветви. Это обеспечивает смешивание цветов на диффузно-рассеивающих экранах и получения цветовой картины. Для каждого испытания задаются цветные стёкла в соответствии с теми, которые установлены в приборе.

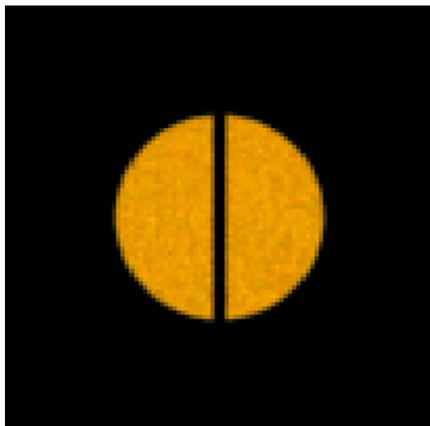


Рисунок. Вид в окуляре поля зрения, полученного в компьютерной модели (испытание «А», слева – модель жёлтого светофильтра, справа – комбинация красного и зелёного светофильтров)

На рисунке видно, что данное поле зрения соответствует тому, что наблюдается в окуляре прибора.

Данная работа позволяет создать компьютерную модель аномалоскопа АН-59 и смоделировать режимы его работы. Также проведённый анализ спектральной зависимости коэффициента пропускания светофильтров упрощает идентификацию оптического материала, из которого они изготовлены, и возможность подбора аналогов, которые производятся в настоящее время. Это необходимо для дальнейшего анализа механизма цветового зрения человека и его аномалий, возможности изготовления аналогов с учётом современного производства. Модель показывает свою работоспособность при анализе всех вариантов режимов работы, что позволяет сделать выводы о возможности использования её в последующих задачах.

### Литература

1. Аномалоскоп: Модель АН-59. Описание конструкции и методики работы/Всесоюз. объединение "Машприборинторг". Москва. Внешторгиздат. 1963. 24 с.: ил.
2. ГОСТ 7721-89 Источники света для измерений цвета. Введён 28.06.89. М. Изд-во стандартов. 1989. 19 с.
3. Программа автоматизированного расчета склеенного компонента. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://aco.ifmo.ru/developed.html> (дата обращения: 21.01.2020).
4. Каталог цветного стекла. Москва : Машиностроение. 1967. 62 с. граф.



**Воробьева Татьяна Валерьевна**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы №В42901,  
направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника,  
e-mail: sakura8440@yandex.ru



**Сечак Евгений Николаевич**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,  
направление подготовки: 05.11.07 – Оптические  
и оптико-электронные приборы и комплексы,  
e-mail: evgenysehak@gmail.com



**Демин Анатолий Владимирович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,  
e-mail: dav\_60@mail.ru

УДК 621.383.7., 629.783., 528.88

**РАЗРАБОТКА ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА**  
**Т.В. Воробьева, Е.Н. Сечак, А.В. Демин**  
**Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Демин**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

В ходе работы проведены исследования разработки телескопической системы для малого космического аппарата, работающего в тепловом инфракрасном диапазоне (3-5) мкм, предназначенного для решения задач дистанционного зондирования Земли. Для возможности получения более информативных изображений предложен вариант конструкции объектива телескопа, которых предусматривает возможность использования двух спектральных диапазонов: видимый и инфракрасный.

**Ключевые слова**

Космический телескоп, инфракрасные приборы, инфракрасное излучение, дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, спутник.

С совершенствованием уровня технологий, в том числе и в направлении космической техники для дистанционного зондирования Земли, появилась возможность создания малых космических аппаратов, которые, в сравнении с большими спутниками, обладают рядом преимуществ: малой массой, стоимостью создания, возможностью применения группировки различных малых космических аппаратов для решения общей задачи [1]. Данные отличительные качества малых космических аппаратов позволяют уменьшить риски при запуске на орбиту и работе в космосе. Применение данных, полученных в результате дистанционного зондирования малым космическим аппаратом, возможно во многих областях, таких как картография, метеорология, океанология, задачи сельского и лесного хозяйства, а также в задачах национальной безопасности. Съёмки дистанционного зондирования позволяют использовать широкий участок спектра – от ультрафиолетового диапазона до радиодиапазона длин волн. На сегодняшний день, чаще всего для дистанционного зондирования Земли используют видимый диапазон спектра и ближний инфракрасный диапазон. Принцип дистанционного зондирования в данных диапазонах основан на регистрации солнечного излучения, которое отражается объектами [2]. Для проведения таких съёмок необходимо освещение, что делает невозможным выполнение съёмок в данном оптическом диапазоне в ночное время. Для обхода данного ограничения есть возможность использования теплового инфракрасного диапазона, съёмка в котором основана на измерении отличия собственной термодинамической температуры объекта от температуры окружающего фона. Перспективными направлениями развития космических аппаратов, работающих в тепловом инфракрасном диапазоне, являются: улучшение пространственного разрешения, возможность реализации работы в нескольких спектральных каналах, уменьшение массы космических аппаратов [3].

Процесс проектирования конструкции объектива телескопа можно разделить на три этапа:

- на первом этапе задаются технологические требования к конструкции, а также приблизительные габаритные размеры. Исходя из заданных условий, выполняется расчет параметров конструкции;
- на втором этапе проектирования выбираются материалы для конструкции, т.к. использование современных материалов позволяет уменьшить массу конструкции, а также улучшить её функциональные качества. Важно выбрать такой материал для элементов, чтобы обеспечить минимальный коэффициент температурного расширения, с учетом расположения элемента конструкции;
- на третьем этапе происходит изготовление модели, которая будет технологически и конструктивно подобна натуральному изделию. Модель необходима для исследования и проведения испытаний на конструкции в симитированных условиях работы натурального изделия.

Таким образом, исходя из заданного диапазона 3-5 мкм, а также ограничений, что разрабатываемый телескоп должен являться малым космическим аппаратом, для конструкции данного объектива телескопа была выбрана схема Корша. Это полностью зеркальная схема, что позволяет использовать её не только в инфракрасном, но и видимом диапазоне, что предусматривает возможность использования нескольких спектральных каналов. Также в данной схеме отсутствует внутренняя бленда, что позволяет значительно уменьшить конструкцию телескопа в размерах. Оптическая схема телескопа с возможностью реализации в двух спектральных диапазонах показана на рис. 1.

Далее была разработана конструкция объектива телескопа (рис. 2), которая обеспечивает работоспособность телескопа в условиях эксплуатации, в которых космический аппарат подвергается воздействию множества факторов, таких как вибрации, перегрузки, перепад температур, невесомость.

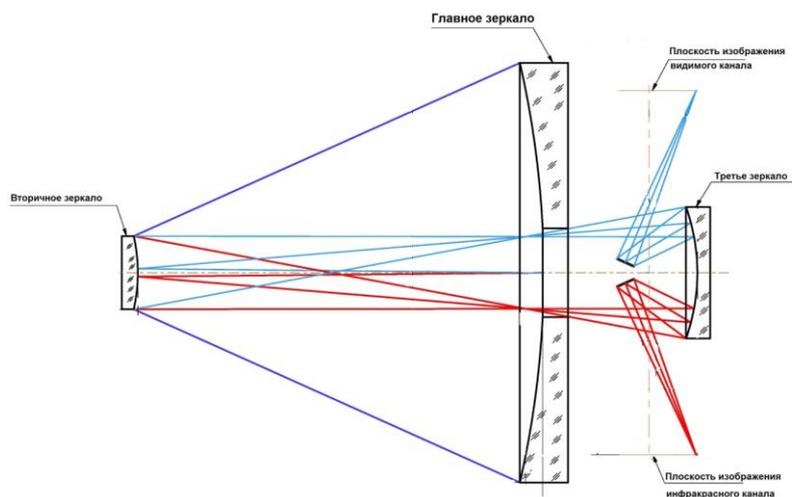


Рис. 1. Оптическая схема телескопа

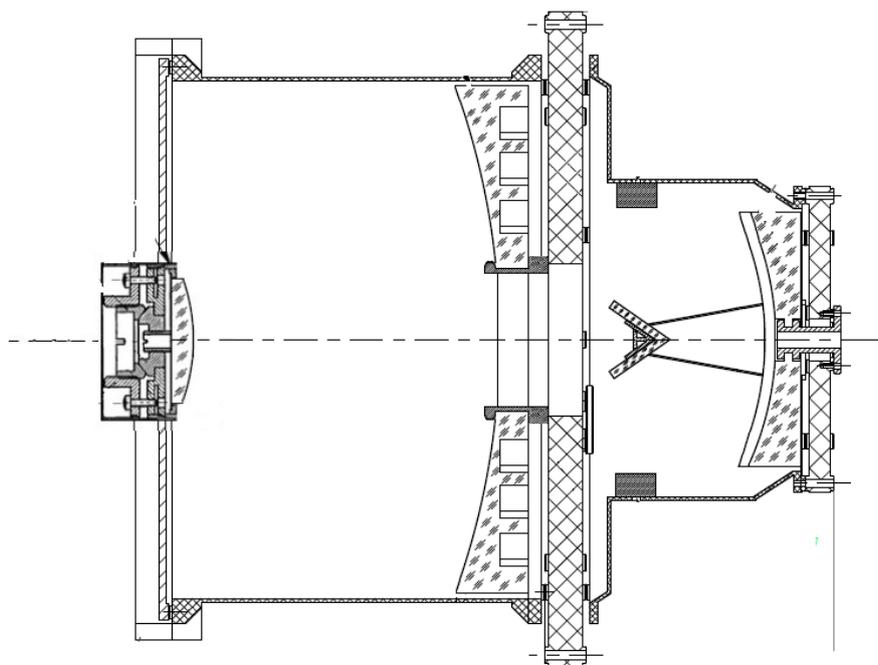


Рис. 2. Сборочный чертеж конструкции

В данной конструкции главное зеркало лишено всех шести степеней свободы за счет крепления на центральном стакане, а узел вторичного зеркала имеет винты и подвижки, которые могут изменять положение зеркала на оптической оси, а также наклонять его, тем самым используя вторичное зеркало как юстировочное.

Материалы корпусных и оптических элементов, а также несущих конструкций были подобраны таким образом, чтобы согласовать механические и оптические элементы по тепловому коэффициенту линейного расширения. Таким образом, зеркала объектива должны быть изготовлены из Ситалла оптического по ОСТ 3-104-77. Корпусные элементы объектива должны быть изготовлены из титанового сплава ОТ4 по ГОСТ 19807-91.

На основе вышеизложенного предлагается реализация инфракрасного телескопа, работающего в спектральном диапазоне 3-5 мкм, с возможностью добавления второго, видимого, спектрального диапазона.

### Литература

1. Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В., Кондранин Т.В, Негоняев С.С. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // ТРУДЫ МФТИ. 2009. Том 1. № 3. С. 14–22.
2. Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие / Е.Н. Сутырина. Иркутск : Изд-во ИГУ. 2013. 165 с.
3. Козлов С.И. Использование инфракрасных приборов в космической технике и дальнейшие перспективы их развития // Вестник науки и образования. 2019. Номер 3-2 (57). С. 10–15.



**Денисов Алексей Олегович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы № В41013с,  
направление подготовки: 12.02.04 – Прикладная оптика,  
e-mail: denisovao1995@mail.ru



**Васильев Александр Сергеевич**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., доцент,  
e-mail: a\_s\_vasilev@itmo.ru

УДК 621.397::004.9

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ПОМОЩЬЮ ОДНОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

**А.О. Денисов**

**Научный руководитель – д.т.н., доцент А.С. Васильев**

### **Аннотация**

В статье представлены сравнительные характеристики основных контролирующих оптико-электронных систем и их преимущества. Обоснован выбор одноканальной системы технического зрения. Поступающая от системы информация анализируется в программной среде Matlab. Приведенная оптико-электронная система направлена на использовании её при контроле качества продукции на массовом производстве.

### **Ключевые слова**

Оптико-электронный прибор, система технического зрения, обработка изображения, конвейерная линия сборки, контроль качества.

На крупных предприятиях остро стоит вопрос об увеличении уровня качества выпускаемой продукции при уменьшении количества персонала, который будет на различных этапах обработки или сборки изделий его проверять на наличие брака. Выходом из этой ситуации становится качественный скачок в уровне контроля качества, т.е. переход от множества сотрудников ОТК, к промышленным оптико-электронным установкам, которые будут быстрее, в ряде случаев качественней, а главное без отрыва от конвейера проверять проходящие мимо них изделия. Для такой проверки используются оптико-электронные системы технического зрения (СТЗ), задачей которых является анализ проходящей мимо них продукции.

При рассмотрении наиболее распространённых и используемых, контролирующих качество, СТЗ, были выделены следующие:

- многоканальная система технического зрения;

- лазерный триангуляционный 2D сканер;
- установка 3D сканирования.

Система технического зрения, основанная на многоканальной СТЗ, используемая на конвейере, предназначена для бесконтактного контроля объектов в процессе производства. Установка позволяет проводить работу без участия человека, что повышает безопасность производственного процесса.

Особенности системы: высокая точность измерений, простота использования, легкость настройки, возможность сортировки продукции по результатам измерений [1].

Лазерный триангуляционный 2D сканер имеет рабочий диапазон от долей микрон до нескольких десятков метров. Имеет возможность работать с объектами любого, даже малого размера, имеющими различный цвет, сложную структуру поверхности и перемещающимися с высокой скоростью, возможность сортировки продукции по результатам измерений [2]. Устройство для 3D сканирования позволяет снять многие ограничения, которые есть у традиционного измерительного оборудования. К преимуществам 3D сканера можно отнести: быстроту измерений, высокую точность оцифровки объектов сложной геометрии, возможность работать автономно, простота в эксплуатации [3]. Для выбора наилучшей системы контроля были выбраны основополагающие параметры, такие как точность измерения, скорость измерения, расстояние до измеряемого объекта. Найденные данные были сведены в таблицу.

Таблица

**Параметры оптико-электронных систем**

	Многоканальная СТЗ	Лазерный триангуляционный 2D сканер	Установка 3D сканирования
Точность измерения	0,10 мм	0,01 мм	0,02 мм
Скорость измерения	10 – 60 м/мин	8 м/мин	10 м/мин
Расстояние до измеряемого объекта	400 мм	200 мм	200 мм

Если требуется построить точную модель и перевести ее в САПР, то анализируя данные приведенные в таблице следует, что предпочтительней становятся системы, которые создают облако точек, с помощью которых существует возможность построить плоскую или объемные модели контролируемой продукции.

Однако, многоканальная система имеет возможность просматривать до 60 метров в минуту, в то время как 2D сканер производит до 40 тыс. сечений в минуту с шагом до 0,2 мм, из чего следует, что его скорость составляет до 8 метров в минуту, а установка 3D сканирования выполняет обработку 50 тыс. измерений в минуту с шагом 0,2 мм, следовательно её предельная скорость работы составляет 10 метров в минуту. Выполнив анализ представленных параметров можно сделать следующий вывод, что при почти одинаковой точности измерения многоканальная система технического зрения намного быстрее производит обработку и анализ качества проходящей мимо нее продукции.

Исходя от важности параметра, как быстродействие, предпочтительней, из описанных оптико-электронных систем, становиться многоканальная система технического зрения.

Произвести реализацию подобной системы без значительных потерь качества можно в упрощенном виде. Вместо использования четырех промышленных камер, которые управляются с помощью сложной автоматики и позиционирования с помощью нескольких шаговых двигателей и оптических линеек, монтироваться на закрепленной стойке будет одна, задачей которой станет проведение процесса высокоскоростной съемки, проходящих мимо неё предметов, и сравнения полученных кадров с фотографией-эталоном. Процесс обработки полученных кадров с камеры возлагается на программную среду Matlab.

Основной задачей цифровой обработки полученных изображений с помощью инструментов Matlab, заключается в распознавании объектов или образов. Методы распознавания подразделяются на две основные категории: методы, основанные на теории решений, и структурные методы. Первая категория имеет дело с образами, описанными с помощью количественных дескрипторов, таких как длина, площадь, текстура. Вторая категория методов ориентирована на образы, для описания которых лучше подходят качественные дескрипторы, такие как реляционные.

В распознавании образцов основную роль играет принцип обучения на выборке эталонных образцов. Позже рассматриваются и иллюстрируются методы обучения, применимые как в структурном подходе, так и в теории решений. [4]

Таким образом, средства обработки Matlab обеспечивают набор основополагающих алгоритмов и приложений рабочего процесса для обработки изображений, анализа, визуализации, а также разработки алгоритмов. В нем можно выполнить сегментацию изображений, повышение качества изображения, шумоподавление, геометрические преобразования, и отобразить регистрацию с помощью глубокого обучения и традиционных методов обработки изображений. Среди множества приложений в Matlab существует Image Processing Toolbox, позволяющий автоматизировать общие рабочие процессы обработки изображений. В интерактивном режиме существует возможность сегментировать данные изображения и отдельно обрабатывать большие наборы данных, поступающих на вход с одной промышленной камеры.

## Литература

1. Система технического зрения для измерения геометрических размеров плоских изделий на конвейере [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://prizmasensors.ru/sistema-izmereniya-geometricheskih-razmerov-ploskih-izdelij/> (дата обращения: 24.12.2019).
2. Триангуляционный 2-D датчик [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://prizmasensors.ru/ls2d-triangulyacionnyj-lazernyj-2d-datchik/> (дата обращения: 24.12.2019).
3. Принцип работы лазерного 3d сканирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3d-daily.ru/equipment/how-laser-3dscanner-work.html/> (дата обращения: 24.12.2019).
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва.: Техносфера. 2005. С. 983–984.



**Динь Ба Минь**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,  
направление подготовки: 05.11.07 – Оптические  
и оптико-электронные приборы и комплексы,  
e-mail: bmdinh@itmo.ru



**Коротаев Валерий Викторович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,  
e-mail: vvkorotaev@itmo.ru



**Тимофеев Александр Николаевич**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., с.н.с.,  
e-mail: timofeev@itmo.ru

УДК 681.786

## **ПОСТРОЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ СОРТИРОВКИ ФРУКТОВ ПО ФОРМЕ, РАЗМЕРУ И ЦВЕТУ**

**Б.М. Динь, А.Н. Тимофеев**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Коротаев**

Работа выполнена в рамках темы НИР №617031 «Исследование и разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

### **Аннотация**

Рассмотрены особенности построения оптико-электронных каналов для обеспечения сортировки фруктов по форме, размеру, текстуре поверхности и цвету. Проведен анализ различных вариантов построения осветительной системы и комбинирования цифровых камер для обеспечения высокой точности сортировки фруктов.

### **Ключевые слова**

Оптико-электронные системы, фрукты, цифровые камеры, обработка изображений, критерий сортировки.

Стоимость фруктов на рынке в большой степени зависит от их качества, поэтому контроль качества фруктов является важной задачей в сельскохозяйственном производстве. Потребности рынка и потребителя, а также растущая социальная обеспокоенность по поводу передовой практики, включая экологическую, экономическую и социальную устойчивость, требуют гарантий качества фруктов от самых ранних стадий сбора урожая до обработки после сбора урожая [1].

Потребительские свойства и качество любой сельскохозяйственной продукции в большей степени проявляются в форме, размере, текстуре поверхности и цвете. Со временем эти информативные параметры изменяются вследствие изменения качественных характеристик плодов. Разработка современных интеллектуальных сортировочных машин, ускоряющих процесс сортировки, является актуальной задачей. Очевидно, что автоматические системы сортировки, работают намного быстрее, чем любые ручные процедуры проверки качества и позволяют проводить эффективную проверку всей продукции с помощью объективных и стабильных критериев. Кроме того, современные технологии позволяют исследовать фрукты в спектральных диапазонах находящихся за пределами области чувствительности человеческого глаза, например в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях. Эти системы предназначены для различных целей, от поточной сортировки по коммерческим категориям до обнаружения загрязняющих веществ или распределения определенных химических соединений в продукте.

Оптико-электронные системы обеспечения сортировки, основанные на машинном зрении, требуют использования множества технологий и знаний, начиная от технологий, связанных с получением изображений (освещение, видеокамеры и т.д.) и заканчивая разработкой алгоритмов обработки полученной информации.

Поэтому целью предлагаемой работы явился анализ свойств существующих систем обеспечения сортировки при комплексировании информации о форме, размере, текстуре поверхности и цвете плодов.

Оптико-электронные системы обеспечения сортировки были внедрены в промышленности как неразрушающие методы для проверки фруктов [1]. Технологические достижения были использованы для различных целей, от автоматической сортировки продуктов по категориям до контроля процессов, которые невозможно наблюдать, например, из-за большой продолжительности [2]. Важно отметить, что качество фруктов не так просто оценить, поскольку мнение людей даже одной и той же категории могут сильно отличаться друг от друга.

На рис. 1 представлена структурная схема наиболее распространенной оптико-электронной системы обеспечения сортировки фруктов.

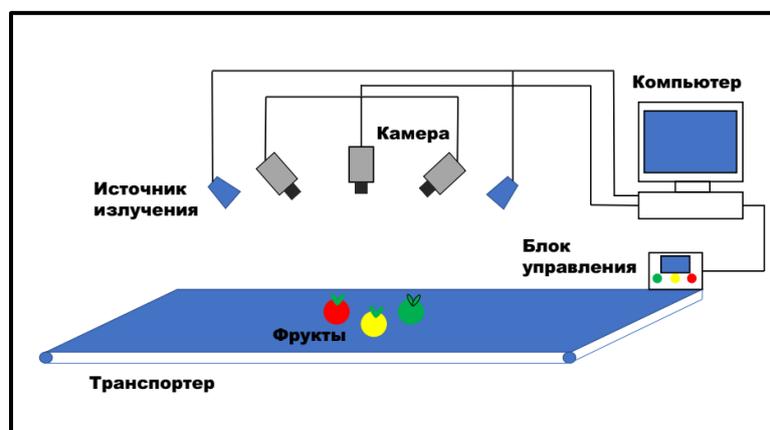


Рис. 1. Структурная схема оптико-электронной системы обеспечения сортировки фруктов

Ключевыми компонентами во всех оптико-электронных системах сортировки фруктов является видеокамеры и источники излучения. В зависимости от требований каждой конкретной задачи, выбор камер может быть различным. Монохромные камеры использовались в первых попытках автоматизировать процесс сортировки фруктов и овощей.

Системы цветного зрения также нашли широкое применение для обнаружения и классификации дефектов поверхности.

Для задачи измерения цвета, наиболее сильно влияющим фактором на точность системы оказывается чувствительность, поэтому для решения этой задачи, предпочтительно используется камеры на основе ПЗС-матриц, поскольку они обладают большей светочувствительностью и лучшей цветопередачей по сравнению с КМОП матрицами.

Обычные цветные камеры плохо идентифицируют дефекты, проявляющиеся в спектральных интервалах за пределами видимого излучения, поскольку они предназначены только для воспроизведения человеческого зрения. Ряд работ продемонстрировали ценность монохромной ПЗС-камеры чувствительной в ближней инфракрасной (NIR) областях спектра, при проверке дефектов плодов [3]. В этом исследовании использовалась камера с NIR-полосовым фильтром для захвата изображений косточковых плодов для обнаружения и идентификации основных дефектов.

Для того чтобы эффективно выявить текстуру поверхности, исследователи также предложили объединить несколько камер. Ряд исследователей для выявления дефектов плодов предложили использовать три ПЗС-камеры: цветную ПЗС-камеру и две монохромные ПЗС-камеры с интерференционными фильтрами 560 нм [3].

В другом устройстве [3] использована камера с двумя ПЗС-матрицами, одна цветная ПЗС-матрица, которая обеспечивает информацию RGB в видимом диапазоне оптического излучения, и другая монохромная, которая предоставляет информацию в спектральном диапазоне NIR. Обработка сигналов осуществляется двумя процессорами. Это устройство позволяет выявлять внешние дефекты плодов с вероятностью 93% для лимонов и 94% для мандаринов.

Другие исследователи [4] обнаружили, что NIR-камера в диапазоне длин волн от 700 до 1000 нм чувствительна к черенку и чашечке и истинным дефектам яблока, тогда как камеры в диапазонах длин волн от 3 до 5 мм и от 8 до 12 мм были чувствительны только к концу черенка и чашечке. На основании этого явления была разработана схема, объединяющая камеры NIR и MIR, и были достигнуты вероятность распознавания 98–86% для черенков и степень распознавания 99–34% для чашечек.

Впоследствии исследователи из Кореи [5] предложили использовать ту же систему на основе сходства пикселей на уровне серого для обнаружения черенка и чашечки на яблоках. Однако на результаты обнаружения дефектов сильно влияет распределение температуры по поверхности плодов при испытаниях.

Общий принцип получения трехмерной формы плодов, как правило, опирается на принцип работы стереоскопических систем, то есть систем, которые имеют по крайней мере две или большее число камер.

Альтернативным вариантом по отношению к стереоскопическим системам являются системы, в которых используются источники оптического излучения со структурированным пучком. В таких системах набор равномерно расположенных параллельных световых полос проецируется на поверхности фруктов одновременно. Полосы на плоских поверхностях имеют вид параллельных линий. Полосы на выпуклых и вогнутых поверхностях вокруг областей стебля и чашечки, имеют вид непараллельных линий.

Основываясь на таких нарушениях, можно провести различие между черенками, чашечками и дефектами. Использование структурированного освещения имеет некоторые препятствия, так как из-за случайности формы и положения плодов, бегущих по технологической линии, трудно обнаружить деформации рисунков освещения и получить анализ изображений, особенно при наблюдении нескольких плодов в области просмотра.

### **Измерение цвета**

Достоинства и недостатки систем на основе компьютерного зрения для внешнего осмотра фруктов или овощей во многом зависят от качества и разрешения получаемых изображений, что тесно связано с используемыми камерами и освещением сцены. Часто такие системы измеряют и сравнивают цвет, и по этой причине требуется освещение с хорошим индексом цветопередачи. Освещение должно быть равномерным и без бликов, которые могут маскировать определенные пятна. Это особенно важно для оценки потребителями двух основных внешних свойств, связанных с качеством фруктов, а именно цвета и наличия внешних дефектов.

Цвет является одним из наиболее важных признаков многих сельскохозяйственных продуктов. Цвет может быть выражен с использованием нескольких стандартных цветовых пространств. Наиболее часто используемыми при обработке изображений в сельском хозяйстве являются цветовые пространства RGB (красный, зеленый, синий) и HIS (оттенок, насыщенность, интенсивность) и CIE LAB. Первое – это естественное цветовое пространство компьютеров и цифровых устройств, а другие пытаются лучше имитировать восприятие человека.

По мере созревания плодов хлорофилл разлагается, и начинают синтезироваться новые пигменты, такие как антоцианы или каротиноиды, в результате чего плод становится зеленоватым и приобретает самые разные цвета. Следовательно, потребитель обычно связывает цвет со зрелостью фруктов, и, таким образом, он играет важную роль в принятии решения о покупке. По этой причине цвет в основном изучался как показатель зрелости.

Цвет фруктов часто выражается с помощью индексов. Индекс основывался на цветовой сегментации плодов с использованием алгоритма k-ближайшего соседа (КБС) и расчета процента площади плодов, принадлежащих одному из четырех предопределенных классов (ярко-зеленый, зеленовато-желтый, красновато-красный, коричневый или черный). Исходя из этих данных, плодам присваивается индекс зрелости от 0 до 4.

Индекс цитрусового цвета (ИЦЦ) — это промышленный стандартный индекс для оценки зрелости апельсинов и мандаринов, основанный на координатах CIE LAB. Разработчики создали систему компьютерного зрения для оперативной оценки этого показателя со скоростью восемь плодов в секунду. Алгоритм преобразовывает координаты RGB в координаты CIE LAB и рассчитывает ИЦЦ для каждого фрукта. При вращении фрукта под камерой, снимаются четыре изображения, а ИЦЦ фрукта рассчитывается как среднее значение ИЦЦ этих четырех изображений.

### **Обнаружение внешних дефектов**

Большинство покупателей связывают качество плодов и фруктов также и с полным отсутствием внешних дефектов. Деформация и наличие повреждения поверхности плода или заболевания являются факторами, сильно влияющими на выбор покупателя. Однако повреждение и заболевание кожицы труднее оценить или выявить, по сравнению с цветом, формой или размером из-за большого разнообразия потенциальных дефектов, которые можно обнаружить при сортировке. Более того, дефекты определенных типов могут иметь разную окраску в одной и той же части или

партии или даже совпадать с цветом здоровой поверхности других фруктов или того же фрукта. Это хорошо видно на рис. 2, где показаны изображения различных типов внешних дефектов плодов апельсинов.

Современные технологии дают возможность выйти далеко за пределы возможностей человеческого глаза.

Многоспектральные системы основаны на нестандартных оптических устройствах для одновременной обработки одной и той же сцены в разных спектральных областях.

В настоящее время захват изображений в стационарных приложениях может быть осуществлен путем использования настраиваемых фильтров, способных получать гиперспектральные изображения на множестве последовательных длин волн. В таких системах получают огромное количество информации, но это также является и основным недостатком, поскольку часть этой информации является избыточной. По этой причине большая часть работы с использованием этой технологии была сосредоточена на сокращении количества избыточной информации путем проецирования многомерного пространства данных в низкоразмерное пространство и попытки сохранить большую часть значимой информации обнаружения.

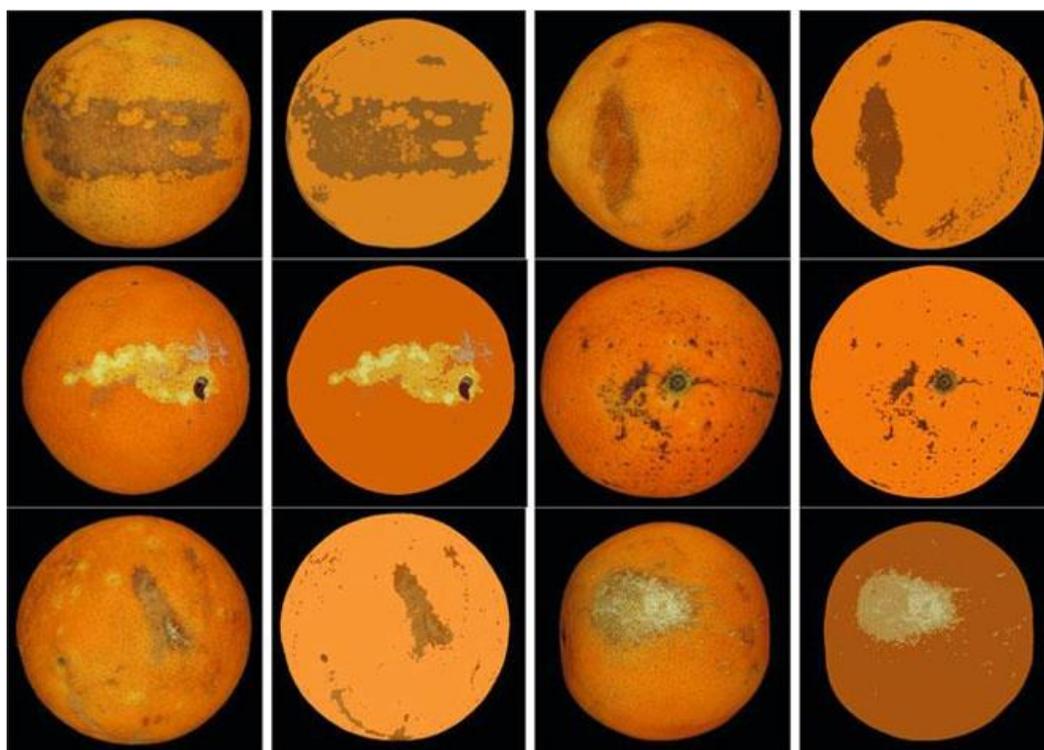


Рис. 2. Виды повреждения поверхности плодов апельсина

В настоящее время доступны три основных технологии получения гиперспектральных изображений для анализа фруктов: спектрофотометры изображений, акустооптические перестраиваемые фильтр (АПФ) и жидкокристаллические перестраиваемые фильтры (ЖПФ).

### Заключение

Для эффективной работы оптико-электронных систем обеспечения сортировки плодов и фруктов необходимо:

- обеспечить равномерное пространственное распределение освещения;
- обеспечить заданное спектральное распределение освещения;

- обеспечить фокусировку видеокамер во всех спектральных интервалах;
- обеспечить требуемое пространственное сопоставление изображений при движении интересующего нас объекта за время получения кадра;
- учесть спектральные различия в чувствительности компонентов датчиков сбора данных.

При освещении плодов необходимо:

- исключить яркие пятна (блики);
- учесть, что лампы накаливания генерируют значительное по величине NIR-излучение, однако оно плохо рассеивается на поверхности многих плодов, например яблок.

Видеокамеры должны быть чувствительны в конкретной спектральной области, используемой в каждом приложении:

- стандартные ПЗС-камеры практически нечувствительны к излучению в области длин волн от 900 нм и выше, что делает невозможным эффективное использование возможностей этого спектрального диапазона;
- камеры на основе датчиков InGaAs со стабилизированной температурой чувствительны в диапазоне длин волн более 1000 нм, что позволяет оптимально использовать информацию в областях NIR и SWIR.

### Литература

1. Cubero S., Lee W.S., Aleixos N., Albert F., Blasco J. Automated systems based on machine vision for inspecting citrus fruits from the field to postharvest: a review // *Food Bioproc Tech.* 2016. №9. P. 1623–1639.
2. Cubero S., Aleixos N., Molto' E., Go'mez-Sanchis J., Blasco J. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables // *Food Bioproc Tech.* 2011. №4. P. 487–504.
3. Aleixos N., Blasco J., Navarro' n, F. and Molto' E. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors // *Comput. Electron. Agric.* 2002. №33. P. 121–137.
4. Wen Z. and Tao Y. Dual-camera NIR/MIR imaging for stem-end/calyx identification in apple defect sorting // *Trans. ASAE.* 2000. №43. P. 449–452.
5. Li Q. Z. and Wang M.H. A fast identification method for fruit surface defect based on fractal characters // *J. Chin. Image Graph.* 2000. №5. P. 441–446.



**Иванова Татьяна Владимировна**

Год рождения: 1973  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н, доцент,  
e-mail: tvivanova@corp.ifmo.ru



**Калинкина Ольга Сергеевна**

Год рождения: 1994  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики, аспирант,  
направление подготовки: 05.11.07 – Оптические  
и оптико-электронные приборы и комплексы,  
e-mail: oskalinkina@itmo.ru



**Куштысева Юлия Олеговна**

Год рождения: 1999  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики факультет,  
студент группы №В3432,  
e-mail: julia.kushtyseva@gmail.com

УДК 535.317

**АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ВОЛНОВОГО ФРОНТА (КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМОВ  
ЦЕРНИКЕ) ПО ФРТ**

**Ю.О. Куштысева, О.С. Калинкина**

**Научный руководитель –к.т.н., доцент Т.В. Иванова**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

В работе рассматривается алгоритм определения параметров волнового фронта, в качестве которых выступают коэффициенты разложения функции волновой аберрации в ряд по полиномам Цернике, по заранее известной функции рассеяния точки (ФРТ). Алгоритм предназначен для осуществления контроля качества изготовления оптических систем по изображению точки и может помочь произвести автоматизацию процесса юстировки контролируемой оптической системы.

**Ключевые слова**

Функция рассеяния точки, волновой фронт, полиномы Цернике, оптимизация, аберрации.

## Введение

На этапе изготовления оптических систем одну из важнейших задач представляет собой контроль качества сборки и юстировки системы. При этом существуют различные методы решения этой задачи, в числе которых можно выделить традиционно используемые интерференционные методы. Однако, в некоторых случаях, одним из которых является осуществление юстировки телескопа в процессе его эксплуатации, требуются другие методы контроля [1, 2]. Также можно отметить метод контроля по функции рассеяния точки или по изображению другого известного объекта. Среди преимуществ применения этого метода при контроле телескопических систем экономическая целесообразность. Во-первых, нет необходимости во внешнем вмешательстве в работающий телескоп. Во-вторых, оборудование, позволяющее регистрировать функцию рассеяния точки (ФРТ), отличается наиболее низкой стоимостью, по сравнению с установками, используемыми при осуществлении интерферометрических методов контроля.

Алгоритмы восстановления волнового фронта получили широкое развитие в голографии, адаптивной оптике, микроскопии и других сферах [3]. Некоторые алгоритмы восстанавливают распределение волнового фронта в виде выборки значений, другие позволяют восстановить описывающие его параметры. Необходимым условием работы такого алгоритма является допущение, что в процессе распространения волнового фронта через оптическую систему изменяется только фазовая составляющая, тогда как амплитудная остается постоянной.

Одним из самых известных алгоритмов является алгоритм Гершберга – Сакстона [4], а также его модификации. Он основывается на итерационном восстановлении фазовой составляющей по известным амплитудам входного и выходного волнового фронта. Классическая версия алгоритма выглядит следующим образом: для заданного распределения интенсивности во входной плоскости и начального значения фазы используя быстрое преобразование Фурье вычисляется комплексная амплитуда в выходной плоскости. Далее, из полученного распределения интенсивности в выходной плоскости вычисляется обратное распространение пучка. Таким образом из полученного распределения во входной плоскости берется значение фазы в качестве следующего приближения.

На его основе было разработано множество алгоритмов с основным условием – использованием двух или более связанных изображений, которые отличаются определенным фазовым разнесением. Отмечено что использование большего количества изображений повышает скорость работы и сходимости алгоритмов.

В данной работе решается задача восстановления волнового фронта лишь по одному известному распределению освещенности. Основное внимание сконцентрировано на определении граничных условий для такого алгоритма.

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма определения параметров волнового фронта, которые представляют собой коэффициенты разложения волновой функции в ряд по полиномам Цернике, по функции рассеяния точки.

## Полиномы Цернике

Один из наиболее распространенных способов описания формы волнового фронта представляет собой разложение в ряд функции волновой аберрации, показывающей отклонение реальной формы волнового фронта от идеальной, по полиномам Цернике, образующим полную ортогональную систему на единичном круге. Полиномы Цернике обладают наиболее простыми свойствами инвариантности, которые проявляются в том, что при повороте координатных осей вокруг центра каждый полином преобразуется в полином того же вида.

Разложение в ряд функции волновой аберрации представляется в виде (1):

$$W(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_m C_{nm} Z_n^m(\rho, \varphi), \quad (1)$$

где  $n, m$  – индексы полиномов, для которых должно выполняться:  $-n \leq m \leq n$ , для четных значений  $n + m$ ;  $C_{nm}$  – коэффициент разложения по полиномам;  $Z_n^m(\rho, \varphi)$  – полином Цернике с соответствующими индексами  $n, m$ ;  $\varphi$  – азимутальный угол;  $\rho$  – радиальное расстояние ( $1 \geq \rho \geq 0$ ).

Каждый полином из системы полиномов Цернике можно соотнести с отдельным типом аберраций. Коэффициенты при полиномах позволяют произвести количественную оценку соответствующих аберраций. Таб. 1 показывает соответствие полиномов Цернике отдельным типам аберраций 3-го порядка.

Таблица 1

**Полиномы Цернике**

Полиномы Цернике	Аберрации
$Z_2^0(\rho, \varphi) = 2\rho^2 - 1$	Расфокусировка
$Z_4^0(\rho, \varphi) = 6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Сферическая
$Z_1^{-1}(\rho, \varphi) = \rho \sin \varphi$	Поперечное смещение ОХ (Дисторсия ОХ)
$Z_1^1(\rho, \varphi) = \rho \cos \varphi$	Поперечное смещение ОУ (Дисторсия ОУ)
$Z_2^{-2}(\rho, \varphi) = \rho^2 \sin 2\varphi$	Астигматизм нечетный
$Z_2^2(\rho, \varphi) = \rho^2 \cos 2\varphi$	Астигматизм четный
$Z_3^{-1}(\rho, \varphi) = (3\rho^2 - 2) \sin 3\varphi$	Кома нечетная
$Z_3^1(\rho, \varphi) = (3\rho^2 - 2) \cos 3\varphi$	Кома четная

Следует также отметить, что еще одним преимуществом полиномов Цернике является устойчивость к погрешностям вычислений в процессе моделирования оптических систем на компьютере или при осуществлении математической обработки результатов измерений.

### Вычисление ФРТ

Функция рассеяния точки (ФРТ) – двумерная функция, представляющая собой распределение интенсивности в изображении точечного объекта.

ФРТ определяется возведением в квадрат функции, полученной обратным преобразованием Фурье зрачковой функции (2):

$$h(\eta'_x, \eta'_y) = \left[ F^{-1} \left( f_0(\rho_x, \rho_y) \right) \right]^2, \quad (2)$$

где  $f_0(\rho_x, \rho_y)$  – зрачковая функция,  $\rho_x, \rho_y$  – канонические зрачковые координаты,  $\eta'_x, \eta'_y$  – канонические координаты на изображении.

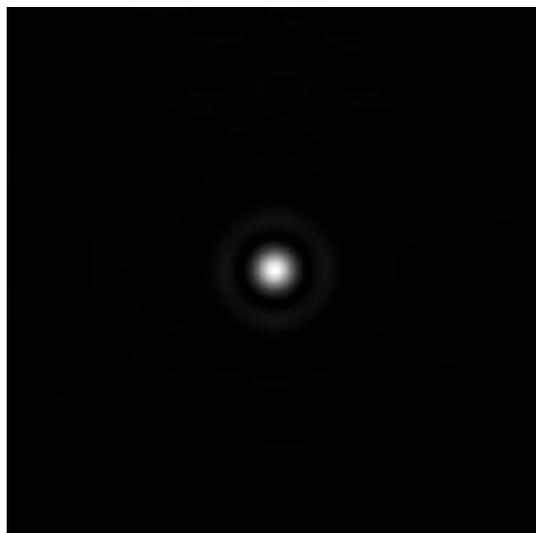
Выражение, описывающее зрачковую функцию, принимает вид (3):

$$f_0(\rho_x, \rho_y) = \begin{cases} \tau^{1/2}(\rho_x, \rho_y) \cdot e^{2\pi i W(\rho_x, \rho_y)}, & (\rho_x^2 + \rho_y^2) \leq 1 \\ 0, & (\rho_x^2 + \rho_y^2) \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

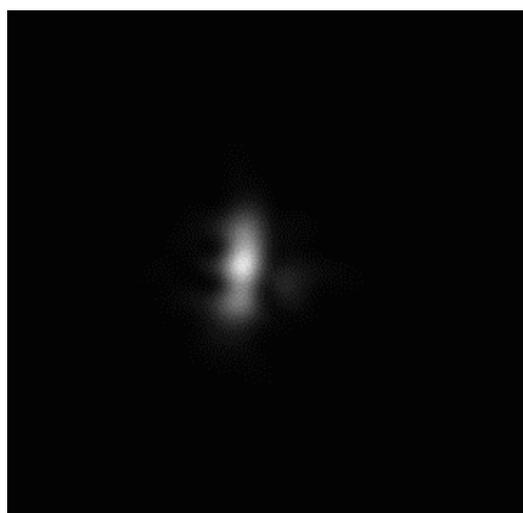
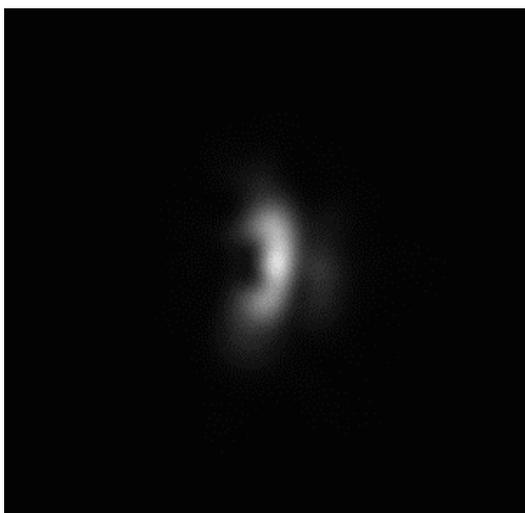
где  $\tau(\rho_x, \rho_y)$  – функция пропускания по зрачку,  $W(\rho_x, \rho_y)$  – волновая аберрация, выражение  $(\rho_x^2 + \rho_y^2) \leq 1$  определяет область внутри зрачка круглой формы.

Безаберрационная ФРТ оптических систем дифракционно-ограниченного качества представлена дифракционным кружком рассеяния, который носит название диск Эйри (рис. 1а), с центральным максимумом в точке, соответствующей идеальному изображению. Аберрации оптической системы и погрешности юстировки оказывают

заметное влияние на изображение точечного объекта. Таким образом, в реальных оптических системах вид ФРТ отличается от безабберационной и может характеризоваться более сложной структурой. На рис. 1б можно увидеть ФРТ, зарегистрированные при контроле реальной телескопической системы.



а)



б)

Рис. 1. Примеры ФРТ.

а) Идеальная ФРТ; б) ФРТ, сформированные реальной телескопической системой.

### Метод

Прямая задача при моделировании оптических систем заключается в вычислении ФРТ по известному набору aberrаций, представленных соответствующими полиномами Цернике.

Обратная задача заключается в восстановлении волнового фронта в виде коэффициентов при полиномах Цернике по известному распределению интенсивности в плоскости изображения. Решение обратной задачи может быть осуществлено при помощи параметрической оптимизации, параметрами которой выступают коэффициенты разложения при полиномах Цернике, а минимизируемая функция

представлена среднеквадратичным отклонением референтной от вычисляемой на каждом шаге оптимизации ФРТ (4) (рис. 2).

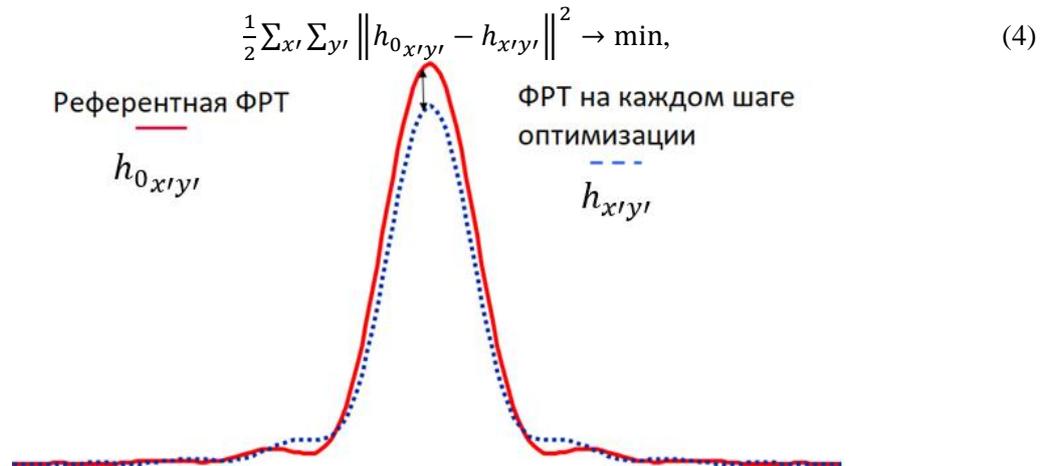


Рис. 2. Минимизируемая функция

В работе разложение в ряд функции волновой aberrации ограничивается четырьмя полиномами: астигматизм четный и нечетный (коэффициенты при соответствующих aberrациям полиномах  $s_{22}$  и  $s_{22}$ ), и кома четная и нечетная (коэффициенты при соответствующих aberrациям полиномах  $s_{31}$  и  $s_{31}$ ). Ограничение связано с тем, что именно эти aberrации оказывают наибольшее влияние на ФРТ в контролируемой телескопической системе.

Моделирование и решение задачи оптимизации осуществляется с использованием библиотеки Ceres Solver [5] для C++ с открытым исходным кодом, разработанной компанией Google.

Решение задачи оптимизации при помощи Ceres Solver в виде (5):

$$\frac{1}{2} \sum_i \|f_i(x_{i_1}, x_{i_2} \dots x_{i_k})\|^2 \rightarrow \min_x, \quad -\infty < x_j < +\infty, \quad (5)$$

где  $f_i(x_{i_1}, x_{i_2} \dots x_{i_k})$  – целевая функция,  $x_{i_1}, x_{i_2} \dots x_{i_k}$  – параметры оптимизации.

Проверка работы метода была основана на сравнении полученных в результате оптимизации коэффициентов aberrаций с исходными, по которым была смоделирована ФРТ, принимаемая за известное распределение интенсивности в плоскости изображения.

### Исследование влияния расфокусировки на сходимость метода

Применение алгоритма к моделируемым сфокусированным ФРТ, проводимое на начальном этапе, приводило в некоторых случаях к неправильному определению знаков коэффициентов  $s_{22}$  и  $s_{22}$ , которые соответствуют четному и нечетному астигматизму, а успешному восстановлению подвергалось относительно небольшое количество ФРТ, смоделированных различными комбинациями определяемых коэффициентов.

Преодоление вышеперечисленных проблем работы алгоритма заключается в использовании расфокусированных ФРТ для определения параметров волнового фронта. Результатом этого стало безошибочное определение знака четного и нечетного астигматизма, а также успешное восстановление коэффициентов aberrаций для большего количества ФРТ, смоделированных разными наборами четырех определяемых коэффициентов.

Поиск такой величины расфокусировки (определяется коэффициентом  $c_{20}$ ), при которой в результате применения алгоритма происходило успешное восстановление коэффициентов aberrаций, произведен эмпирическим методом. Таким образом, при проверке работы алгоритма с большим количеством смоделированных ФРТ, была определена оптимальная величина коэффициента  $c_{20}$  определяющего расфокусировку, которая находится в диапазоне от 0,1 до 0,2 длины волны (по модулю), приводящая к успешному восстановлению небольших по величине коэффициентов aberrаций (не более 0,5 длины волны) (таб. 2).

Таблица 2

Результат оптимизации

$c_{20} = 0,1\lambda$	исходные значения	результат оптимизации	исходные значения	результат оптимизации	исходные значения	результат оптимизации
$c_{31}[\lambda]$	0,05689	0,05689	0,14173	0,14173	0,31352	0,31352
$s_{31}[\lambda]$	0,07813	0,07813	0,12195	0,12195	0,35279	0,35279
$c_{22}[\lambda]$	0,09347	0,09347	0,13306	0,13306	0,32016	0,32016
$s_{22}[\lambda]$	0,06019	0,06019	0,18319	0,18319	0,39148	0,39148
Кол-во итераций	5		8		14	

ФРТ, соответствующие большим значениям коэффициентов aberrаций, имеют более сложный математический вид, что затрудняет оптимизацию Ceres Solver, поскольку в этом случае наложены ограничения на вид оптимизируемой функции. Изменением величины расфокусировки можно добиться такого вида оптимизируемой функции, при котором успешно реализуется оптимизация Ceres Solver. На рис. 3 приведены примеры ФРТ, соответствующие одному набору искомым коэффициентов при полиномах Цернике  $c_{22} = 0,2 \lambda$ ,  $s_{22} = 0,6 \lambda$ ,  $c_{31} = 0,6 \lambda$ ,  $s_{31} = 0,4 \lambda$ , но с разными значениями расфокусировки  $c_{20}$ . Успешным восстановлением заданных значений коэффициентов при полиномах Цернике характеризуется только выделенный среди приведенных примеров ( $c_{20} = 0,6 \lambda$ ).

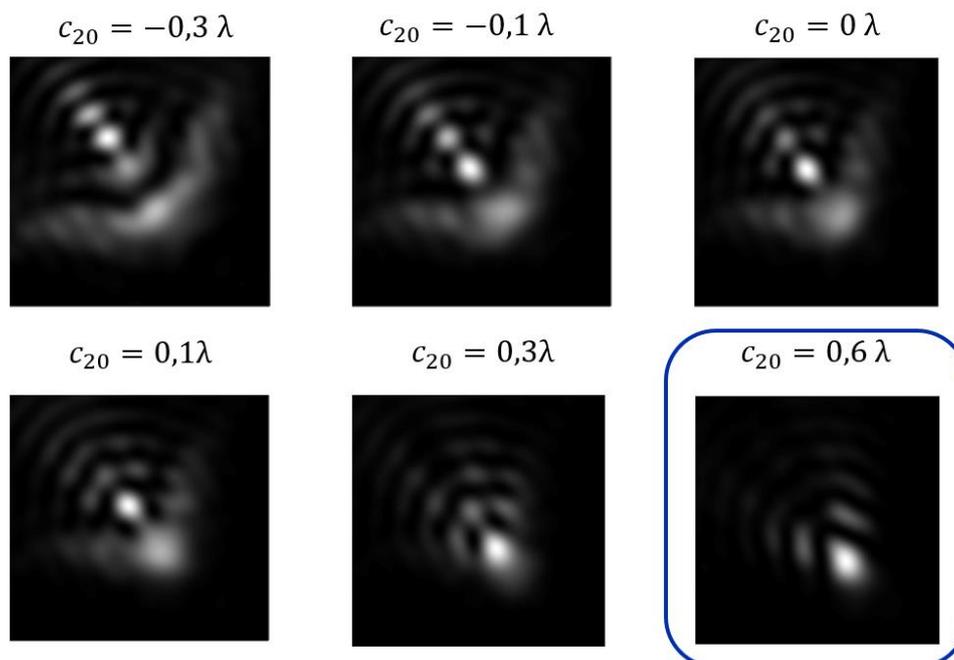


Рис. 3. Пример ФРТ с вручную подобранной расфокусировкой

### Вывод

Представленный в работе алгоритм предназначен для определения параметров волнового фронта по функции рассеяния точки. При этом на стабильность работы алгоритма заметное влияние оказывает использование расфокусированных ФРТ, поскольку сфокусированное ФРТ не дает достаточное количество информации для оценки aberrаций, а наличие расфокусировки упрощает определение коэффициентов aberrаций. Для определения малых aberrаций (не более 0,5 длины волны по модулю) оптимальная расфокусировка находится в пределах 0,1-0,2 длины волны по модулю. Большая величина aberrаций усложняет структуру ФРТ, но увеличивая абсолютное значение расфокусировки можно добиться такого вида ФРТ, при котором оптимизация Ceres Solver успешно справляется с восстановлением коэффициентов aberrаций, однако такое значение расфокусировки нужно подбирать для каждого случая.

### Литература

1. Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н., Давыдов А.Н., Поляков К.А. Компенсация aberrаций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа // Компьютерная оптика. 2017. том 41. №1.
2. Krist J.E., Burrows C.J. Phase-retrieval analysis of pre- and post-repair Hubble Space Telescope images // Applied optic. 1995. Vol. 34. No. 22.
3. Brady G.R. Application of phase retrieval to the measurement of optical surfaces and wavefronts: Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy. – University of Rochester, Rochester New York. 2008.
4. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // ОПТИК. 1972. Vol. 35. No. 2.
5. Ceres Solver – A Large Scale Non-linear Optimization Library [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ceres-solver.org/>. (Дата обращения: 13.02.2019).



**Кожина Анастасия Дмитриевна**

Год рождения: 1995  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,  
направление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,  
оптические и биотехнические системы и технологии,  
e-mail: crensta@mail.ru



**Цыганок Елена Анатольевна**

Год рождения: 1986  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н, доцент,  
e-mail: llenal@mail.ru



**Андреев Лев Николаевич**

Год рождения: 1928  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н, профессор

УДК 535.317, 681.7

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ  
ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СПЕКТРА**

**А.Д. Кожина, Е.А. Цыганок, Л.Н. Андреев**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Л.Н. Андреев**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

В работе представлено исследование методики прогнозирования хроматической aberrации положения для различных участков спектра. Показано, что данная методика работает для двух оптических материалов. Представлены примеры работы метода.

**Ключевые слова**

Хроматическая aberrация положения, ахромат, апохромат.

Современные технические системы формирования оптического изображения часто содержат более двух рабочих каналов, которые пропускают свет в различных спектральных диапазонах, или один канал, передающий широкий спектральный

диапазон от УФ до ИК. Таким образом, входящая оптическая система должна обеспечить требуемые оптические характеристики и высокое качество изображения во всем рабочем спектральном диапазоне, что подразумевает полную или частичную коррекцию хроматической аберрации.

Методы проектирования линзовых оптических систем на первом этапе разработки сталкиваются с проблемой подбора оптических материалов. На данный момент для уменьшения либо коррекции хроматических аберраций используют:

- компоненты оптической системы содержащие стекла с аномальным ходом дисперсии;
- подбор оптических материалов вручную;
- подбор оптических материалов графическим методом [1];
- оптимизация в специальных программных комплексах для расчёта оптических систем;
- увеличение воздушного промежутка между неахроматизованными компонентами оптической системы [2];
- трассировка лучей с последующей оптимизацией [3];
- применение дифракционных оптических элементов [4].

Как видно из вышесказанного, не существует единого метода коррекции хроматических аберраций, а используемые в настоящее время имеют ограничения. А именно, стекла с аномальным ходом дисперсии имеют ограниченную номенклатуру. Методы с использованием оптимизации сильно зависят от начальной схемы. При увеличении расстояний между компонентами длина системы может превышать в несколько раз ее фокусное расстояние. А дифракционные оптические элементы имеют высокую стоимость и побочные порядки дифракции.

В ахроматических системах, график зависимости значения хроматизма положения от длины волны имеет вид, представленный на рис. 1. При уменьшении спектрального диапазона вторичный спектр уменьшается, при увеличении - возрастает в разы.

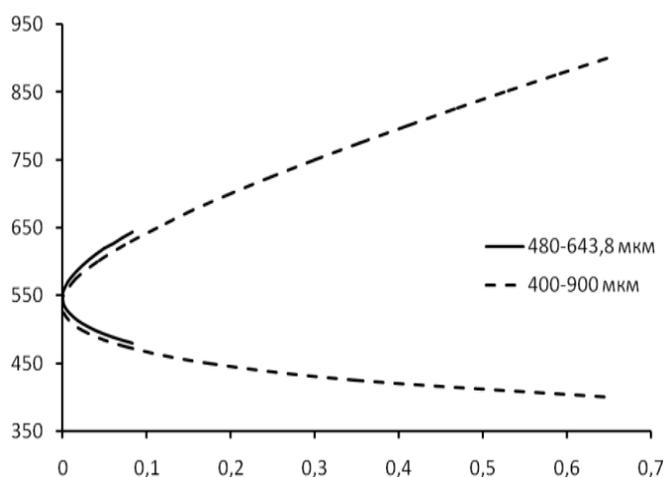


Рис. 1. График зависимости значения хроматизма положения от длины в ахроматических системах

Большинство систем, работающих в широком спектральном диапазоне имеют 2 канала. Структурная схема подобных систем приведена на рис. 2. Фронтальная часть оптической системы должна пропускать излучения и в видимой и в ИК областях спектра. При этом она должна обеспечивать апохроматическую коррекцию. На рис. 3 представлен типовой график хроматической аберрации положения при

апохроматической коррекции. Из графика видно, что при уменьшении спектра система теряет не только апохроматичность, но и ахроматичность. Хроматическая aberrация при этом корректируется объективами, работающими в выделенной части спектрального диапазона.



Рис. 2. Структурная схема систем, работающих в широком спектральном диапазоне

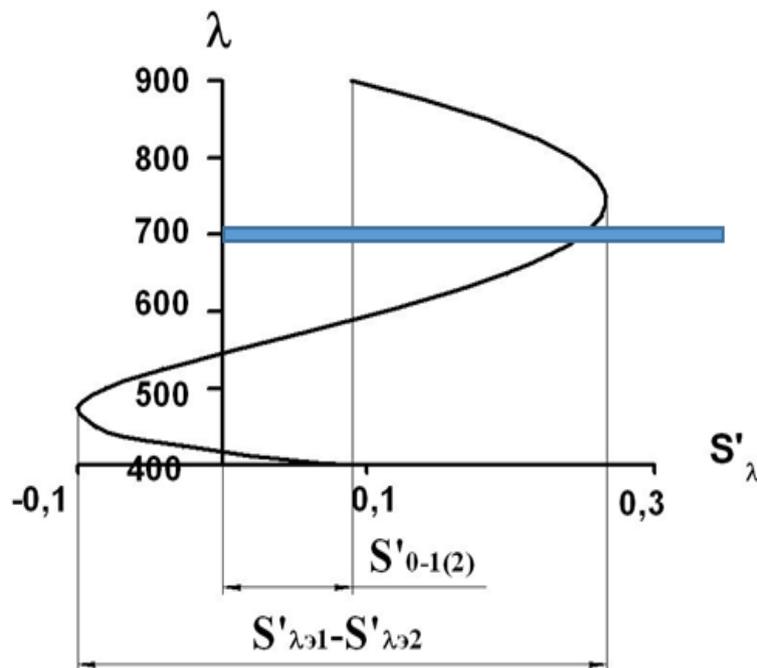


Рис. 3. График зависимости значения хроматизма положения от длины в апохроматических системах

Подобную ситуацию можно наблюдать и в УФ области. На рис. 4 представлен объектив, работающий в УФ и видимой области спектра. Как видно из графика (рис. 5), данный объектив разрабатывался в первую очередь для ультрафиолетовой области спектра, где он работает как апохромат. При увеличении спектрального диапазона хроматическая коррекция ухудшается. По этой причине необходимо знать, как изменится остаточный хроматизм положения разрабатываемой системы при изменении спектрального диапазона.

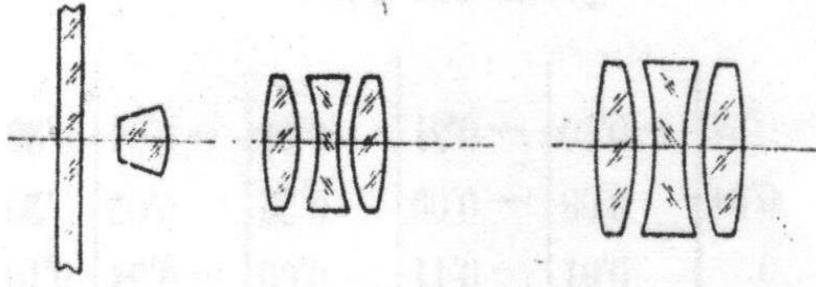


Рис. 4. Схема объектива 16x0,25 для 0,240-656нм

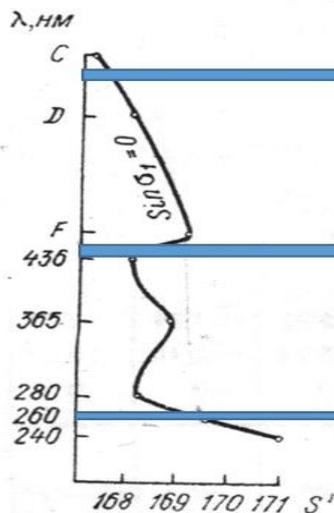


Рис. 5. График зависимости заднего отрезка от длины волны

Рассмотрим методику прогнозирования хроматической aberrации положения, предложенную профессором Александром Пантелеймоновичем Грамматиным [5].

Представим оптическую систему склеенной линзы, выполненной из обычных стекол, у которых числа Аббе и относительные частные дисперсии лежат на одной прямой в прямоугольной системе координат. Уравнение прямой представлено формулой (1).

$$p_{\lambda} = t - a_{\lambda}v, \quad (1)$$

где  $t = \frac{p_{\lambda_2}v_1 - p_{\lambda_1}v_2}{v_1 - v_2}$  и  $a_{\lambda} = \frac{p_{\lambda_2} - p_{\lambda_1}}{v_1 - v_2}$ .

Подставляя (1) в выражение для определения коэффициента хроматической aberrации положения, мы получаем формулу (2).

$$S_{(1)II} = tS_{(1)I} - a \sum_i^n h_i^2 \varphi_i. \quad (2)$$

Вторая часть этого уравнения представляет собой коэффициент остаточного хроматизма положения или вторичного спектра. Для систем, состоящих из материалов, числа Аббе и относительные частные дисперсии которых лежат вблизи одной прямой, значение вторичного спектра остается в узких пределах. Поэтому при малых изменениях параметров оптической системы на стадиях доводки вторичный спектр практически не изменяется. Поэтому изменение хроматических aberrаций будет определяться уравнением (3).

$$\Delta S_{(1)II} = t\Delta S_{(1)I}. \quad (3)$$

Для вычисления значения хроматической аберрации, исследуемой длины волны, используется формула (4). В коэффициентах  $k$  и  $c$  содержатся значения хроматизма положения для двух известных длин волн.

$$S'_{\lambda_3} - S'_{\lambda_0} = [(a_3 - a_0) + k(t_3 - t_0)]c. \quad (4)$$

Проверка данного метода производилась на склейке, состоящей из оптических стёкол N-BK7 и N-SF6, с фокусным расстоянием 100 мм. Был выбран видимый спектральный диапазон: F, e и C. В таб. 1 приведены значения хроматизма положения для 4 длин волн, две из которых находятся внутри диапазона F и C, а две другие превышают его. Значения, взятые из программы расчета оптики и рассчитанные исследуемым методом – близки. Кроме того, были введены воздушные промежутки между компонентами для определения их влияния на точность метода. Как видно из таб. 1 значения, полученные программой расчета оптических систем и рассчитанные исследуемым методом также близки (рис. 6).

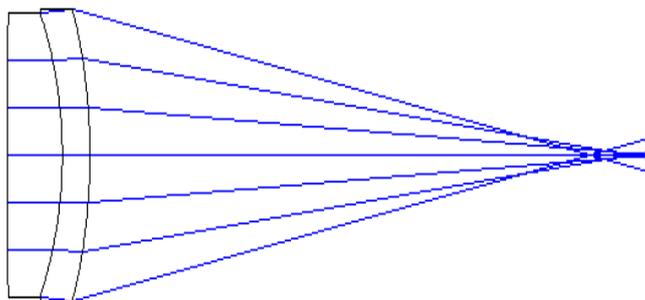


Рис. 6. Оптическая система склейки N-BK7/N-SF6

Таблица 1

**Сравнение значений хроматической аберрации положения для склейки линз**

d, mm	f', mm	S <sub>F</sub> -S <sub>e</sub>	S <sub>C</sub> -S <sub>e</sub>	S <sub>D</sub> -S <sub>e</sub>		S <sub>g</sub> -S <sub>e</sub>		S <sub>C'</sub> -S <sub>e</sub>		S <sub>r</sub> -S <sub>e</sub>	
				Zemax	Метод	Zemax	Метод	Zemax	Метод	Zemax	Метод
0	100.0	0.162	-0.292	-0.118	-0.118	0.259	0.256	-0.258	-0.258	-0.412	-0.411
0.5	99.7	0.172	-0.303	-0.124	-0.124	0.284	0.281	-0.268	-0.268	-0.426	-0.425
5	96.8	0.260	-0.392	-0.166	-0.166	0.490	0.487	-0.350	-0.350	-0.540	-0.539

Так как числа Аббе и относительные частные дисперсии должны лежать на одной прямой, применение этого метода ограничено двумя материалами, поэтому было принято решение проверить работоспособность метода на оптической системе, содержащей из двух марок стекол, но с большим количеством линз. Для это был выбран триплет с фокусным расстоянием 40 мм и относительным отверстием 1:5, внешний вид которого представлен на рис. 7. Как видно из таб. 2, данный метод позволяет производить прогнозирования хроматической аберраций положения для оптических систем состоящий из двух материалов, с большим количеством линз.

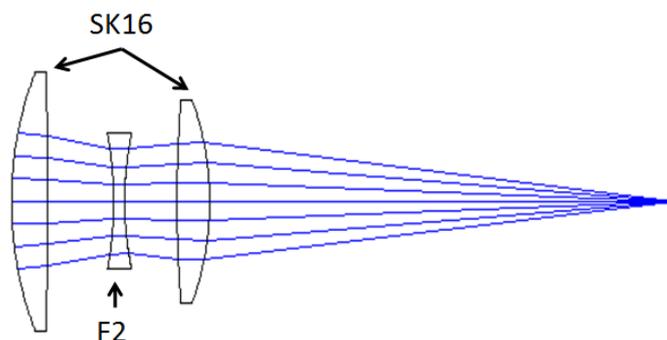


Рис. 7. Оптическая система триплета  $f'=40\text{мм}$ , 1:5

Таблица 2

Сравнение значений хроматической aberrации положения для триплета

$S_F-S_e$	$S_C-S_e$	$S_D-S_e$		$S_g-S_e$		$S_{C'}-S_e$		$S_r-S_e$	
		Zemax	Метод	Zemax	Метод	Zemax	Метод	Zemax	Метод
0.010	-0.073	-0.024	-0.024	-0.033	-0.035	-0.063	-0.063	-0.113	-0.114

Как видно из выше сказанного, методика, разработанная профессором Грамматиным, дает возможность прогнозировать хроматизм положения для длины волны на основе значений хроматической aberrации для двух других длин волн. Однако предложенный метод предназначен для систем, состоящих всего из двух марок стекол. В дальнейшем планируется расширить данный метод для большего числа стекол. Предполагается это сделать методом аппроксимации прямой  $p(\nu)$  и методом эквивалентного стекла и сравнить результаты.

### Литература

1. Robb P.N., "Selection of optical glasses. 1: Twomaterials". Appl. Opt. 24, 1864-1877 1985.
2. Duplov Roman Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses // Applied optics. 006. №21 (45) pp. 5164-516.
3. Dmitry Reshidko, José Sasian, "Algorithms and examples for chromatic aberration correction and athermalization of complex imaging systems," Proc. SPIE 9293, International Optical Design Conference 2014.
4. Егоров Д.И. Исследование и разработка объективов микроскопа для спектральной оптической когерентной томографии. Автореферат диссертации. СПб. 2016. 17с.
5. Грамматин А.П., Окишева Е.В. Связь между хроматическими aberrациями оптических систем для различных участков спектра // "ОМП". 1990. №7. С. 39–41.



**Ле Куок Фам**

Год рождения: 1990  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант группы № 7229,  
направление подготовки: 18.06.01 – Химическая технология,  
e-mail: quosphampro@gmail.com



**Успенская Майя Валерьевна**

Год рождения: 1970  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,  
e-mail: mv\_uspenskaya@mail.ru

УДК 677.494.743.22

## **СВОЙСТВА ПВХ НАНОВОЛОКОН, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ**

**Ле Куок Фам**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор М.В. Успенская**

### **Аннотация**

В настоящее время одним из наиболее эффективных способов получения нановолокон является электроформование. К нановолокнам относятся волокна, у которых диаметр меньше одного микрометра. Благодаря свойствам нановолокон, таким как высокая прочность, высокое соотношение длины к диаметру волокна, большая площадь поверхности, нановолокна применяются во многих областях. В работе исследуется процесс получения и свойства нановолокна на основе поливинилхлорида. В результате работы были получены нановолокна с диаметром 390 нм. Прочность на растяжение и модуль упругости для полученных волокон составили 3,0 МПа и 64 МПа, соответственно.

### **Ключевые слова**

Поливинилхлорид, свойства, электроформование, прочность на растяжение, нановолокна

### **Введение**

С развитием многих областей науки и техники все больше уделяется внимания на материалы с улучшенными свойствами. Наноматериалы вообще и наноматериалы на основе полимеров, в частности, являются материалами с превосходными свойствами, открывающими удобство использования и возможность развития во многих областях. Полимеры наноразмерного уровня обычно изучаются в форме наночастиц или нановолокна. При этом наибольший интерес представляет исследование свойств нановолокна. Существуют различные методы получения нановолокна такие, как вытягивание [1], метод нанопильера [2], фазовое разделение [3] или

электроформование [4, 5]. Электроформование было успешно опробовано в 1934 году [6], но только с 1990 годов оно получило особое внимание, и начало интенсивно развиваться. На рис. 1 представлено количество публикаций по теме «электроформование» за последние 10 лет.

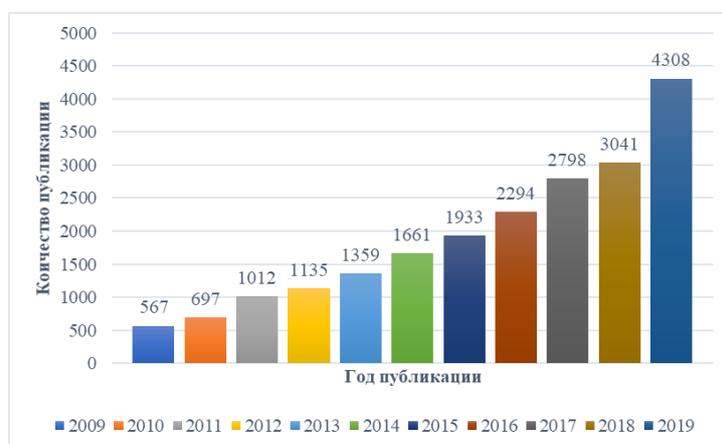


Рис. 1. Дата анализа с использованием базы данных Elsevier B.V. по теме “electrospinning” до декабря 2019 года

Электроформование представляет собой современный и эффективный метод, в котором используется электрическое поле для получения тонких волокон. Диаметр получаемых волокон может варьироваться от нескольких микрон до нанометров. Эти волокна находят широкое применение в различных отраслях промышленности (рис. 2).



Рис. 2. Область применения полимерных нановолокна

Существуют много факторов, которые влияют на свойства, структуру и морфологию нановолокон. К ним можно отнести такие, как параметры раствора

(молекулярная масса полимера, температура стеклования полимера, растворимость), параметры формовочного раствора (концентрация раствора, вязкость, проводимость, поверхностное натяжение), технические параметры процесса (приложенное напряжение, скорость подачи раствора, расстояние между коллектором и иглой, диаметр иглы, тип коллектора), и параметры окружающей среды (температура, влажность, давление) [7].

В работе были получены нановолокна на основе поливинилхлорида (ПВХ) и изучены морфология и механические характеристики полученных волокнистых плёнок.

### **Экспериментальная часть. Материалы**

Порошок поливинилхлорида (ПВХ) с молекулярной массой 40000 был получен от ООО «Клэкер Пентапласт Рус» (Санкт-Петербург, Россия). N, N-диметилформамид (ДМФА) был приобретен у АО «ЭКОС-1» (Москва, Россия). Тетрагидрофуран (ТГФ) был приобретен у ООО Химмед (Россия).

### **Получение нановолокон на основе ПВХ**

Порошок ПВХ растворяли в смеси растворителей ДМФА и ТГФ (1:1 по объему) для получения раствора ПВХ 15 %, перемешивая на магнитном мешалке при 50 °С до полного растворения. Волокнистые пленки были получены с помощью аппарата для электроформования NANON-01A (MECC CO., LTD., JAPAN) с использованием плоского и барабанного коллектора. Скорость вращения барабанного коллектора была 500 об/мин. Электроформование проводилось при приложенном напряжении 20 кВ, скорости подачи раствора 0,5 мл/ч, расстояния между наконечником иглы и коллектора равным 15 см.

### **Измерение механических свойств**

Механические свойства волокнистых пленок были измерены на испытательной машине (Инштрон, США). Скорость движения траверсы составляла 50 мм/мин. Размер образцов для испытаний 100x10 мм. Измерение было проведено для не менее чем 5 образцов при комнатной температуре.

### **Результат и обсуждение**

Для изучения морфологии нановолокон электроформование проводили в течение 10 минут. Затем образцы исследовали на оптическом микроскопе. Программа ImageJ для была использована для определения диаметра нановолокон. По результатам анализа было получено, что диаметры нановолокна ПВХ для образца на плоском коллекторе и барабанном коллекторе при 500 об/мин составляют 420 и 390 нм, соответственно (рис. 3).

Для образцов, полученных на плоском коллекторе, толщина пленки не равномерна, она посередине больше и меньше по краям. Для образцов, полученных на барабанном коллектором, толщина пленки равномерна. Образцы были вырезаны из нановолоконного маты из центральной части. Толщина образцов была измерена электронным микрометром и составила 20 мкм. Результаты измерения на прочность и модуль упругости для образца, полученного на плоском коллекторе, составляют 2,2 МПа и 53,2 МПа, соответственно. А для образца, полученного на барабанном коллекторе, равны 3,0 МПа и 64,1 МПа, соответственно (рис. 4). Таким образом можно предположить, что увеличение механической прочности образцов на барабанном коллекторе возможно за счет получения более однородного образца.

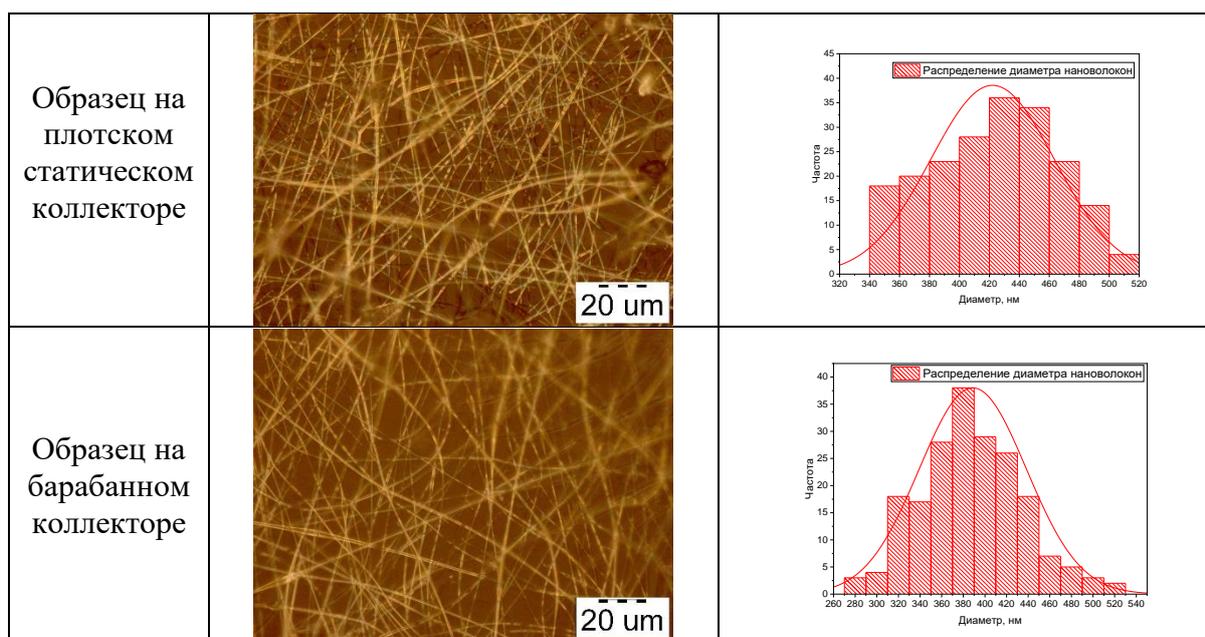


Рис. 3. Морфология и распределение диаметров нановолокна

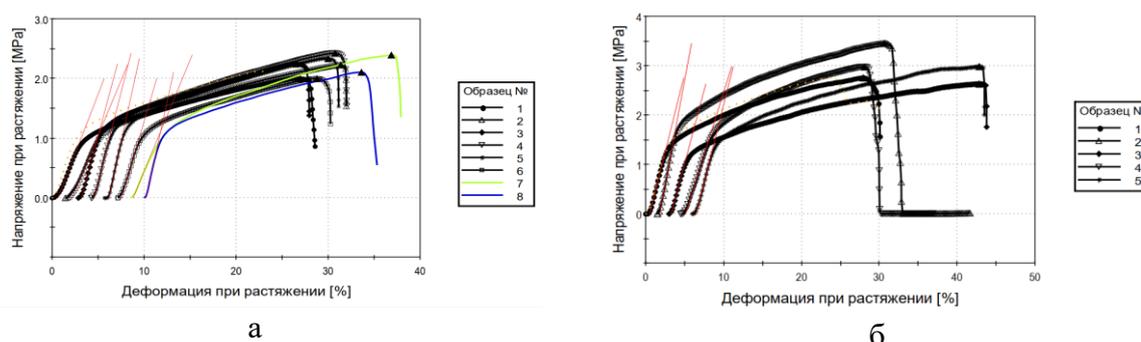


Рис. 4. Диаграммы напряжение-деформация образцов материала, а: для образцов на плотском статическом коллекторе; б: для образцов на барабанном коллекторе.

### Вывод

Нановолокна, полученные методом электроформования имеют широкое применение в различных областях, Средний диаметр полученных нановолокон из ПВХ составляет 390 нм и 420 нм при использовании барабанного и плоского коллектора, соответственно. Для получения волокнистых пленки оптимально использование барабанного коллектора, так как можно получить пленку с повышенными механическими свойствами. Получены волокнистые маты могут применяться в качестве армирующего наполнителя для композиционных материалов.

### Литература

1. Suzuki A., Mikuni T., Hasegawa T. Nylon 66 nanofibers prepared by CO<sub>2</sub> laser supersonic drawing // Journal of Applied Polymer Science. 2014. Vol. 131. 11 с. doi: 10.1002/app.40015.
2. Feng L., Li S. H., Zhai J., Song Y. L., Jiang L., Zhu D. B. Template Based Synthesis of Aligned Polyacrylonitrile Nanofibers Using A Novel Extrusion Method // Synthetic Metals. 2003. Vol. 135–136. P. 817–818. doi:10.1016/s0379-6779(02)00909-8.

3. Subbiah T., Bhat G.S., Tock R.W., Parameswaran S. and Ramkumar S.S. Electrospinning of nanofibers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 96 – P. 557–569. doi:10.1002/app.21481.
4. Mirjalili Mohammad, Zohoori Salar. Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry // *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2016. Vol. 6. doi:10.1007/s40097-016-0189-y.
5. Medeiros E.S., Glenn G.M., Klamczynski A.P., Orts W.J., Mattoso L.H.C. Solution blow spinning: A new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions // *Journal of Applied Polymer Science*. 2009. Vol. 113(4). P. 2322–2330. doi:10.1002/app.30275.
6. Formhals A., Process and apparatus for preparing artificial threads: US Patent No. 1,975,504. Publ. 02. 10.1934.
7. Kong Lingyan & Ziegler Gregory. Quantitative relationship between electrospinning parameters and starch fiber diameter // *Carbohydrate polymers*. 2019. Vol. 92. P. 1416–1422. doi:10.1016/j.carbpol.2012.09.026.



**Лебедев Вячеслав Евгеньевич**

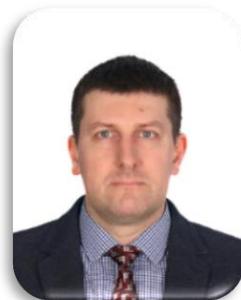
Год рождения: 1982

Университет ИТМО,

студент группы №В42901,

направление подготовки: 12.04.02 – Оптико-цифровые  
системы и технологии,

e-mail: bestlomo@yandex.ru



**Рудин Ярослав Вадимович**

Год рождения: 1973

Университет ИТМО,

к.т.н., доцент,

e-mail: yaroslav-r@mail.ru

УДК 681.7.077

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ МИКРОСКОПИИ**

**В.Е. Лебедев**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Я.В. Рудин**

### **Аннотация**

В работы рассмотрены оптические характеристики и их связь с системой позиционирования в микроскопии. Предложен критерий разработки системы позиционирования.

### **Ключевые слова**

Микроскопия, микроскоп, система позиционирования, минимальный шаг, критерий системы позиционирования.

### **1. Введение**

Со времени разработки первых микроскопов, задача позиционирования объекта не перестает быть актуальной. Цель не изменилась со времени создания первых микроскопов в 16-17 веках. Её можно определить как выведение объекта исследования по оси наблюдения в предметную плоскость системы микроскопа. Для этого было разработано большое разнообразие приемов и принципов. А повсеместное внедрение автоматизации и видео фиксации дополнили разнообразие существующих методов прецизионными системами.

В данном исследовании, я дам описание системы позиционирования, микроскопии и микроскопа, определю основные параметры микроскопа, затрону тему дифракционного предела и определю критерий шага данной системы.

### **2. Цели и задачи**

В качестве целей данного исследования я отмечу:

1. Оптические характеристики и их связь с системой позиционирования.
- 1.1 Основные определения.
- 1.2 Характеристики.
- 1.3 Определение критерия для системы позиционирования.

### 3. Основная часть

#### 3.1 Основные определения

Систему позиционирования можно определить как совокупность технических решений призванных определить объекту исследования заданные координаты пространства, а так же имеющей возможность перемещения объекта по заданному закону в данном пространстве. Целью системы позиционирования например для микроскопии может являться сохранение положения объекта исследования в предметной плоскости на оси системы наблюдения. В простейшем случае в качестве системы наблюдения выступает глаз человека. А в качестве системы позиционирования могут выступать например руки человека.

Известно определение микроскопии как науки о малом видении, это буквальный перевод с древнегреческого. А так же как способ изучения малых объектов с помощью устройства микроскоп. Микроскопия бывает оптической, флуоресцентной, рентгеновской, электронной, сканирующей зондовой. В то же время микроскоп определяется как прибор, предназначенный для получения увеличенных изображений, а так же измерения объектов или деталей структуры, невидимых или плохо видимых невооружённым глазом. В свою очередь микроскопия является совокупностью технологий и методов практического использования микроскопов [1].

#### 3.2 Характеристики

К основным характеристикам микроскопа относят разрешающую способность, полезное увеличение, глубину резкости [2]. Рассмотрим эти характеристики по порядку.

Разрешающая способность-это способность прибора различать мелкие детали. Иными словами-это наименьшее расстояние между изображением двух соседних точек, которые различаются отдельно. При рассмотрении предельных размеров разрешаемых микроскопом используем законы физической оптики и рассматриваем свет как волну. Понятие разрешающей способности было введено Эрнстом Аббе, немецким физиком, математиком, который предложил рассматривать малые участки любого объекта, как дифракционную решётку. Тогда изображение полученное с помощью оптической системы, есть результат интерференции и дифракции световых лучей на дифракционных решётках, прошедших через эту систему и определил разрешающую способность светового микроскопа.

Нам известно, что разрешение микроскопов ограничено свойством дифракции на объективе. При опорной волне дневного света с  $\lambda=555$  нм. максимальное разрешение составит около 0,2 мкм. А максимальное увеличение порядка 2000 крат. В то же время, например, электронные микроскопы при увеличении 200 тысяч крат дают разрешение уже 0,5 нм.

Для волн существует эффект дифракционного предела. Это одно из свойств волн. Но в современной микроскопии это ограничение относительно недавно начали обходить применяя технологии сканирующих систем для микроскопии. Что позволило улучшить показатель разрешения для микроскопии в видимом свете до  $\lambda/20$ . Теперь можно различать частицы до 0,1 нм. Хотя раньше этот показатель не превышал 400 нм.

Таким образом можно ввести критерий для системы позиционирования, при ее разработке, это минимальный шаг позиционирования объекта в микроскопии должна быть не меньше разрешающей способности микроскопа.

Рассмотрим следующий основной параметр микроскопа – полезное увеличение. Полезное увеличение – это видимое увеличение, при котором глаз наблюдателя будет

полностью использовать разрешающую способность микроскопа, то есть разрешающая способность микроскопа будет такая же, как и разрешающая способность глаза.

Используя характеристику полезного увеличения можно перейти к полю зрения микроскопа, определенного как

$$2y = \frac{500 \tan(\omega')}{\bar{r}}, \quad (1)$$

где  $\omega'$  - угловое поле окуляра.

Поле зрения микроскопа это круг с диаметром  $2y$ . В контексте разработки системы позиционирования для микроскопии максимальным шагом перемещения можно определить диаметр поля зрения микроскопа. Это даст возможность изучать пространство объекта исследования полностью. Однако наилучшим решением видится определение шага как размер стороны вписанного квадрата. Это даст возможность проводить автоматизированную обработку объекта исследования.

$$a = \frac{2R}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$a$  – это сторона квадрата вписанного в окружность,  $R$  – радиус окружности.

### 3.3 Требования к системе позиционирования

К основным характеристиками системы позиционирования относят минимальный шаг перемещения. На основании вышеизложенного предлагаю определить требование к этой характеристике:

$$\text{разрешающая способность} > \text{шаг} > \text{поле зрения} \quad (3)$$

## 4. Заключение

В заключении можно сделать следующие выводы. В результате проделанного исследования определен критерий системы позиционирования в микроскопии. Это позволяет предъявлять технические требования к синтезу системы позиционирования для определенных микроскопов.

## Литература

1. Микроскоп // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). СПб. 1890-1907.
2. МГТУ им. Н.Э.Баумана Световая микроскопия и количественная обработка изображений структур и материалов // учебное пособие. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://lab.bmstu.ru/sm/index.htm>, своб. Дата обр. 15.12.2019



**Наседкин Борис Александрович**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО,

факультет фотоники и оптоинформатики,

аспирант,

направление подготовки: 03.06.01 – Физика и астрономия,

Сибирский федеральный университет,

e-mail: b.nasedkin@bk.ru



**Вьюнышев Андрей Михайлович**

Год рождения: 1983

Институт им. Л.В. Киренского СО РАН,

ФИЦ КНЦ СО РАН,

к.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе,

e-mail: vyunishev@iph.krasn.ru

УДК 535.015

**ИСТОЧНИК КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФОТОНОВ  
НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО  
КРИСТАЛЛА ТИТАНИЛ-ФОСФАТА КАЛИЯ**

**Б.А. Наседкин, А.М. Вьюнышев**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., В.И. Егоров<sup>1</sup>**

**1 – Университет ИТМО**

**Аннотация**

В данной работе рассмотрен источник коррелированных фотонов на основе периодически поляризованного кристалла титанил-фосфата калия. Получены основные характеристики источника коррелированных фотонов.

**Ключевые слова**

Спонтанное параметрическое рассеяние, коррелированные фотоны, нелинейный фотонный кристалл, фазовый квазисинхронизм, бифотоны.

Квантовые свойства одиночных и коррелированных фотонов находят своё применение в различных областях физики и технологиях: в криптографии, спектроскопии, литографии, квантовых вычислениях, генерации случайных чисел, исследовании неклассических состояний света. Ввиду широкого спектра применения коррелированных фотонов существует потребность в различных источниках коррелированных фотонов, характеристики которых определяются природой физических явлений, в результате которых они генерируются. Среди таких характеристик стоит выделить поляризацию, угол разлёта фотонов, время корреляции и длины волн, на которых они генерируются. В настоящее время существует несколько различных способов получения коррелированных фотонов, среди которых наиболее распространены следующие: спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) [1], четырёхволновое смешение [2] и генерация коррелированных фотонов в полупроводниках [3]. В нашей работе будет рассматриваться источник на основе

периодически поляризованного кристалла титанил-фосфата калия, в котором реализуются условия квазисинхронизма II-типа для спонтанного параметрического рассеяния. Примечательно, что условия синхронизма выполняются в определённом направлении, при котором фазовая расстройка равна нулю. В то же время периодическая модуляция нелинейной поляризации кристалла позволяет в качестве такого направления выбрать наиболее эффективное, при этом фазовая расстройка будет компенсироваться за счёт вектора обратной решётки [4]. Такие условия называют условиями квазисинхронизма и записывают следующим образом:  $\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i + \vec{G}\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i + \vec{G}$ , где  $\vec{k}_p$ ,  $\vec{k}_s$ ,  $\vec{k}_i$  являются волновыми векторами для основной, сигнальной и холостой волн, соответственно, а  $\vec{G}$  – вектор обратной решётки. Реализация данного условия совместно с законом сохранения энергии, выражающемся в уравнении баланса частот, определяет основные свойства коррелированных фотонов: ортогональность поляризаций сигнального и холостого излучения, их угол разлёта и длины волн. Целью данной работы является получение источника коррелированных фотонов на основе нелинейного фотонного кристалла и описание его характеристик.

Для реализации СПР со вторым типом квазисинхронизма была выбрана коллинеарная схема генерации, представленная на рис. 1. В качестве источника излучения был использован лазерный диод, генерирующий излучение с длиной волны 405 нм, стабилизированный по току и температуре. Мощность излучения фиксировалась на уровне 0,17 мВт. Для выделения одной моды и сужения спектра лазерного излучения был реализован внешний резонатор по схеме Литмана. После излучение было направлено на полуволновую пластинку ПП, которая используется для контроля мощности излучения лазера накачки при заданной поляризации, и призму Глана ПГ1, положение которой задает поляризацию, соответствующую поляризации основного излучения. Далее линза Л1 с фокусным расстоянием 10 см фокусировала основное излучение на периодически поляризованный кристалл титанил-фосфата калия, в котором реализуются условия квазисинхронизма II-типа. Период модуляции составлял 10 мкм при длине структуры 10 мм. В результате было сгенерировано сигнальное и холостое излучение на длинах волн вблизи 810 нм. Линза Л2 использовалась для коллимации и направления генерируемого излучения на счётчики одиночных фотонов. Дихроичное зеркало ДЗ, которое пропускает излучение с длиной волны 810 нм и отражает с длиной волны 405 нм использовалось для выделения излучения, генерируемого в результате СПР. Для тех же целей дополнительно был использован интерференционный фильтр на 810 нм с полушириной на полувысоте порядка 10 нм. Для разделения сигнального и холостого излучения был использован поляризационный лучеделитель ПЛД, после которого излучение с помощью объективов фокусировалось в оптоволокно, сопряженное со счетчиками одиночных фотонов С1 и С2 (SPMC-AQR-14-FC, Excelitas Technologies) на основе лавинных фотодиодов. Их квантовая эффективность достигает 60% при длине волны 810 нм, а мёртвое время составляет порядка 50 нс. В качестве счетчика совпадений был использован время-цифровой преобразователь С.С (qTau, qTools) с временным разрешением около 80 пкс.

В серии измерений, в которой призма Глана последовательно помещалась в каналы перед счетчиками одиночных фотонов (далее каналы А и В), были получены результаты, представленные на рис. 2. Видно, что кривые числа отсчетов смещены друг относительно друга на 90 градусов, что свидетельствует об ортогональности поляризаций фотонов в каналах. Это доказывает, что в кристалле титанил-фосфата калия реализуется второй тип синхронизма, при котором сигнальное и холостое излучения имеют ортогональные поляризации.

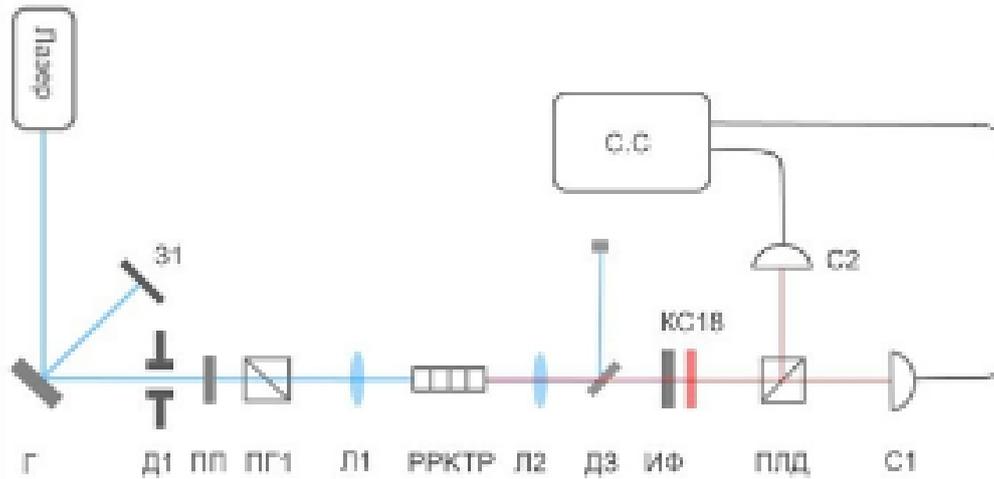


Рис. 1. Упрощённая схема установки генерации коррелированных пар фотонов в периодически поляризованном кристалле титанил-фосфата калия (РРКТР)

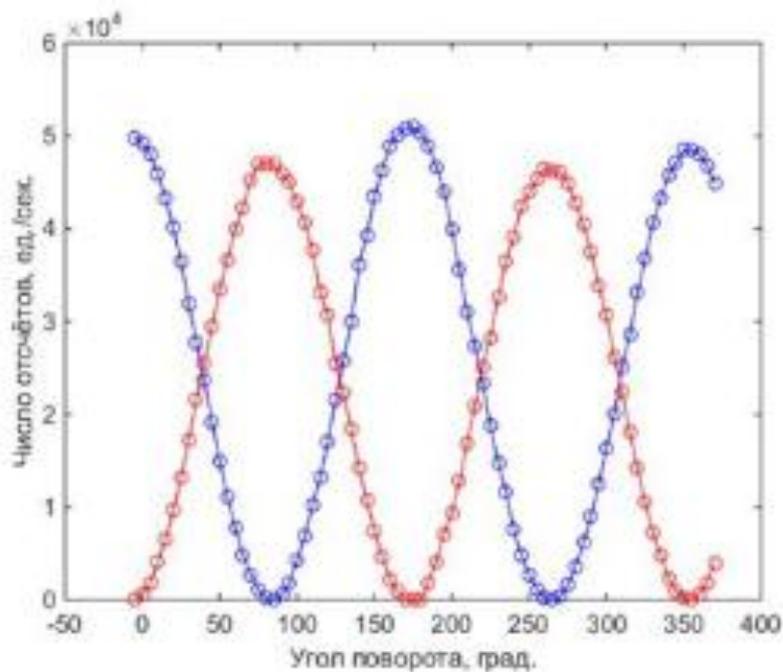


Рис. 2. Зависимость числа корреляций в каждом из каналов.  
 Синие точки – при установке призмы в канал А, красные точки – при установке в канал В

Максимальное число совпадений отсчётов (корреляций) достигало 50000 ед./сек. при общем числе отсчетов порядка 200000 ед./сек. При этом число ложных совпадений отсчётов в каналах может быть оценено величиной 1% от максимально возможного числа отсчётов.

Используя время-цифровой преобразователь, было получено распределение числа совпадений событий (отсчётов) от временной задержки. Для получения симметричной кривой программным путем была введена фиксированная временная задержка между каналами – 3 нс. В результате была получена симметричная кривая распределения, представленная на рис. 3. Исходя из полученных результатов, ширина корреляционной кривой, иначе – время корреляции, составляет порядка 0,7 нс. Оно характеризует разность между временами рождения фотонов, которое зависит от параметров кристалла.

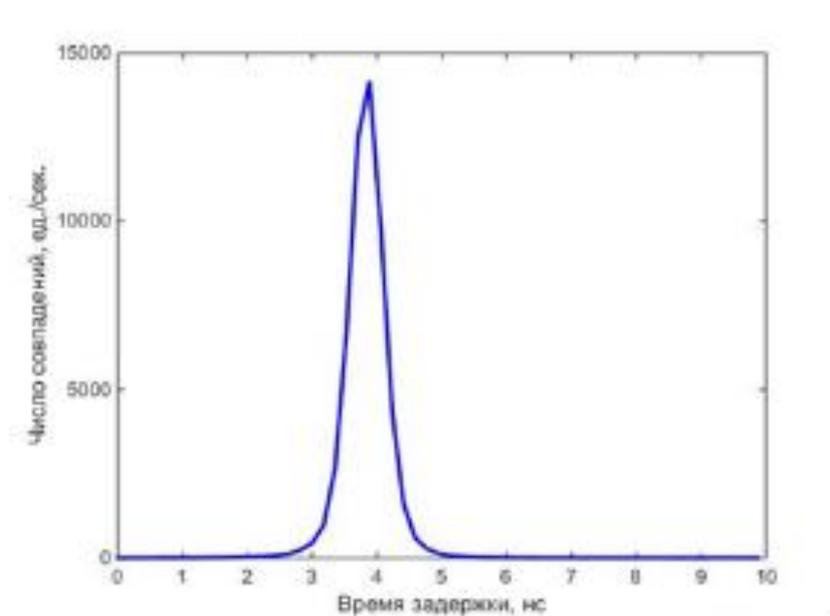


Рис. 3. Временное распределение числа совпадений событий

В результате проделанной работы реализован источник коррелированных фотонов на основе периодически поляризованного кристалла титанил-фосфата калия. Длины волн сигнального и холостого излучения составили порядка 810 нм, фотоны распространялись коллинеарно, поляризации фотонов были ортогональны. Число совпадений событий составляет 50000 ед./с, при мощности накачки 0,17 мВт, что составляет порядка 25% от общего числа регистрируемых счётчиками событий. Время корреляции одиночных фотонов составило порядка 0,7 нс.

### Литература

1. Smith B.J., Mahou P., Cohen O., Lundeen J.S., Walmsley I.A. Photon pair generation birefringent optical fibers // *Optics Express*. 2009. Vol. 17. No. 26. P. 23589-23602.
2. Kim T., Fiorentino M., Wong N.C. Phase-stable source of polarization-entangled photons using a polarization Sagnac interferometer // *Phys. Rev. A*. 2006. Vol. 74. – P. (012316) 1-5.
3. Muñoz-Matutano G., Wood A., Johnson M., Asensio X.V., Baragiola B., Reinhard A., Volz T. Quantum-correlated photons from semiconductor cavity polaritons // *arXiv:1712.05551*. 2017. Vol. 1. P. 1-12.
4. Magel G.A., Jundt D.H., Bayer R.L., Fejer M.M. Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation // *IEEE Journal of Quantum Electronic*. 1992. Vol. 28. No. 1. P. 2631-2654.



**Сидорова Людмила Александровна**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы № В 42081,  
направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника,  
e-mail: Lysya-228@mail.ru



**Рыжова Виктория Александровна**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., доцент,  
e-mail: victoria\_ryz@itmo.ru

УДК 555.32

## **ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НАЧАЛЬНОГО И СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**Л.А. Сидорова, В.А. Рыжова**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Рыжова**

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

### **Аннотация**

Работа посвящена рассмотрению основных принципов построения системы видеомониторинга на объектах общеобразовательных учреждений, обоснованию и выбору комплекса аппаратно-технических средств обеспечения безопасности на основе анализа задач видеоконтроля. Система видеонаблюдения призвана создать условия для безопасного пребывания учащихся и персонала на объектах и территориях учебных заведений.

### **Ключевые слова**

Видеоинформационные системы, видеонаблюдение в общеобразовательных учреждениях, система безопасности, класс защиты, контроль доступа, идентификация личности, предотвращение терроризма, интеллектуальный поиск, видеоаналитика.

### **Введение**

Тенденция развития требований по ужесточению мер антитеррористической безопасности общеобразовательных учреждений привела к появлению обязательств по установке систем видеонаблюдения на социальных объектах. Требования по обеспечению технической защиты объектов определяются на основании Федерального закона «О технических средствах обеспечения противокриминальной защиты объектов и имущества». В зависимости от вида и размера ущерба, который может быть нанесен

объекту, людям и имуществу в случае реализации криминальных угроз, объекту присваиваются соответствующие класс и группа.

В зависимости от категории значимости объектов происходит их классификация в пределах четырех групп (А1, А2, Б1 и Б2) [1]:

- объекты группы А1 – объекты высокой важности и ценности, либо высокой опасности;
- объекты группы А2 – наиболее опасные помещения на объектах группы А1;
- объекты группы Б1 – объекты розничной торговли;
- объекты группы Б2 – объекты с хранением и размещением товара.

Как следствие, каждой группе присваивается свой класс защиты объекта, который определяется в зависимости от степени угроз и возможных последствий. В соответствии с классом защиты объекты подразделяют на следующие виды [1]:

- критически важные и потенциально опасные объекты;
- социально значимые объекты;
- объекты сосредоточения материальных ценностей.

Видеонаблюдение в общеобразовательных учреждениях контролирует безопасность объекта на самом высоком уровне. Во время организации учебного процесса в учебных заведениях вопросы безопасности, обеспечения посещаемости, обеспечения охраны здоровья учащихся и персонала занимают ключевые места. Системы видеомониторинга, внедренные в общеобразовательные учреждения, призваны обеспечить выполнение таких функций, как: охрана объекта, администрирование, обеспечение здоровья, информирование. В настоящее время масштабное размещение систем видеомониторинга сопровождается проведением исследований для повышения эффективности их функционирования.

Цель данной работы состоит в разработке основных принципов организации систем видеомониторинга для объектов общеобразовательных учреждений, анализе категорирования объектов и зон видеонаблюдения, и, как следствие, рассмотрении предъявляемых к видеокамерам технических требований, в зависимости от зон их установки.

### **Категорирование объектов и зон видеоконтроля**

Объекты, на которых планируется установка систем видеонаблюдения, проходят процедуру присвоения категории опасности. Результатом является “Паспорт безопасности” объекта, где указываются требования к организации системы видеонаблюдения.

Категория охраняемого объекта – это комплексная оценка объекта, которая учитывает его экономическую значимость и зависит от характера ценностей.

Исходя из представленной выше информации, сделан вывод, что объектам начального и среднего образования присвоен класс 2 (средняя значимость), ущерб в результате реализации криминальных угроз приобретет региональный или межмуниципальный масштаб, и группа объекта №2, так как объект социально-значимый.

Теперь рассмотрим требования к зонам наблюдения на объектах.

В таблице указано распределение по категориям опасности для зон видеоконтроля для обоснования выбора параметров видеокамер в местах их установки.

В зависимости от категории опасности зоны видеоконтроля, к видеокамерам предъявляются индивидуальные технические требования. Ключевыми для обнаружения, распознавания или идентификации объекта являются разрешающая способность, чувствительность, способность обеспечивать достоверное изображение при наличии движения в поле зрения видеокамер.

**Соответствие зоны видеоконтроля категории опасности**

Зоны видеоконтроля	Категория опасности					
	1	2	3	4	5	6
Ограждение территории			+	+	+	+
Выездные ворота			+	+	+	+
Главный вход			+	+	+	+
Служебные входы			+	+	+	+
Эвакуационные выходы				+	+	+
Эвакуационные лестницы				+	+	+
Запасные входы, выходы				+	+	+
Холл	+	+	+	+	+	+
Коридоры				+	+	+
Помещения с ценностями	+	+	+	+	+	+
Подвальные помещения				+	+	+

Кроме того, анализируя категории зон опасности установки видеокамер, конкретизируют составляющие системы: тип используемых камер, формат формирователей сигнала изображения, параметры применяемых объективов, а также особенности крепления видеокамер, пресечение возможности скрытного вмешательства в работу видеосистемы, влияние погодных условий.

Система видеонаблюдения по своим функциональным свойствам технических средств защиты должна соответствовать требованиям ГОСТ Р 51558-2014 «Средства и системы охраны телевизионные. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний».

Применительно к защите образовательного учреждения требования к видеосистеме можно сформулировать следующим образом [2]:

- система должна обеспечивать подтверждение факта несанкционированного проникновения в зону охраны и выявлять, исключать ложные срабатывания;
- контролировать объекты охраны зданий образовательного учреждения и прилегающие к ним территории с помощью прямого видеонаблюдения;
- осуществлять оперативный контроль действий сотрудников учреждения и службы безопасности и предоставлять своевременно информацию для координации таких действий;
- вести непрерывную запись информации в архивы для последующего анализа состояния охраняемого объекта, тревожных ситуаций, идентификации нарушителей;
- иметь возможность взаимодействия с другими подсистемами интегрированных систем безопасности, которые устанавливаются для обеспечения противокриминальной защиты (охранно-пожарная и тревожная сигнализации, система контроля и управления доступом, системы оповещения, эвакуации и пожаротушения).

Система видеомониторинга обеспечивает архивирование сжатого видеопотока, регистрируемого видеокамерами. С учетом динамики перемещения объектов на объектах образования и на прилегающих территории к данной функции системы применяются индивидуальные требования, такие как [1, 2]:

- алгоритм сжатия - MJPEG, H.264;
- степень сжатия видеоданных - не более 40%;
- частота передачи видеoinформации - не менее 12 кадров/с;

- разрешение записи – от 2 до 5 Мп.

Требования к формированию глубины архива имеют 2 подхода:

- исходя из категории значимости объекта (для социально-значимых объектов-30 дней);

- в течение времени, которое задается условиями и режимом охраны объекта.

Видеозапись производится в зависимости от требований безопасности охраняемого объекта. На объектах образовательной деятельности видеозаписи может осуществляться:

- непрерывно;
- периодами, по заданному расписанию;
- по обнаружению несанкционированного проникновения в охраняемую зону;
- по срабатыванию видеодетектора тревожного события системы видеомониторинга.

На общеобразовательных объектах формируют требования к использованию системы видеоаналитики, которая позволяет оптимизировать запись, хранение и поиск видеоинформации в архиве. Для обеспечения безопасности объектов начального и среднего образования действенным является применение видеоаналитики на основе [3]:

- а) технических систем и средств идентификации физических лиц;
- б) технических систем и средств обнаружения тревожных ситуаций.

Для обнаружения и идентификации физических лиц предъявляются следующие технические требования к вероятностным параметрам обнаружения тревожного события [4]:

- вероятность ложного пропуска для алгоритмов и аппаратно-программных средств детекции не более 5%;
- вероятность ложно отрицательной идентификации для алгоритмов и аппаратно-программных средств не более 15%;
- вероятность ложноположительной идентификации для алгоритмов и аппаратно-программных средств — средств не более 1%;
- пропускная способность аппаратно-программных средств идентификации – не более 3 секунд.

Кроме этого, должна обеспечиваться освещенность в плоскости лица от 100 до 1000 люкс, неравномерность освещенности допустима не более 50%.

Разрешение изображений, которое обеспечивает регистрацию изображения лиц на рабочей дистанции не менее 1,5 метра, должно советовать 40 пикселям, цветность изображения допустимо черно-белое.

При обнаружении тревожных ситуаций аппаратные средства должны иметь чувствительность не менее 99%, время реакции на появление объекта от 1 до 300 секунд, с шагом в 1 секунду.

Для обнаружения оставленных предметов оборудование должно иметь чувствительность 95%, время реакции на оставленный предмет в диапазоне от 1 до 300 секунд, шаг – 1 секунда [4].

Обнаружение тревожных ситуаций предполагает обмен информацией с системой сбора результатов технического мониторинга и контроля с использованием унифицированных протокола передачи данных и формата метаданных, разработанного на основе XML.

Независимо от того, является ли система видеонаблюдения обязательной к установке или устанавливается по желанию собственника, при планировании ее размещения на объекте важно соблюдать требования законодательства о пожарной безопасности, которые регламентируются соответствующими нормативными документами.

При интеграции системы видеонаблюдения с другими системами безопасности важно обеспечить возможность взаимодействия и обмена между ними данными и командами.

### **Принципы организации системы видеомониторинга**

Одним из важных условий при создании системы видеонаблюдения является использование сертифицированного оборудования видеонаблюдения. Оборудование, которое используется при проектировании выбирается исходя из его возможности решать ключевые вопросы. Обычно учитывают при выборе два фактора: зона обзора и целевая задача наблюдения на проектируемом объекте. От зоны обзора будет зависеть выбор фокусного расстояния и размер матрицы, а также высота и место установки камер. От целевой задачи наблюдения зависит минимально допустимое разрешение матрицы для детализации изображений. Критерием выбора является плотность пикселей. К целевым задачам видеонаблюдения на объектах общеобразовательных учреждений относятся [5]:

- обнаружение (наблюдение за обстановкой, верификация тревог и обнаружение перемещающихся объектов);
- идентификация (получение четкого изображения лица в зоне наблюдения);
- раздельное восприятие нескольких объектов контроля, которые расположены рядом, либо выделение деталей контроля (позволит контролировать пересечение зоны контроля посторонними лицами).

Рассмотрим основные зоны видеоконтроля для общеобразовательных учреждений.

#### **1. Прилегающая территория**

Наиболее востребована камера перед главным входом. Именно ее чаще всего просматривает в режиме "живого времени" охранник, которому важно своевременно увидеть посетителей и посторонних. Изображение с камеры должно быть достаточно крупным для опознания человека, стоящего перед входной дверью. При этом необходимо контролировать запасные входы и укромные уголки территории.

#### **2. Входная зона**

Внутренняя камера перед входом помогает контролировать перемещения внутри наблюдаемой зоны, также фиксирует конфликтные ситуации и попытки несанкционированного проникновения посторонних. Она же контролирует рабочее место охранника, способствуя повышению его трудовой дисциплины.

#### **3. Раздевалки**

В школьных раздевалках происходит большинство краж. Полностью пресечь это явление видеонаблюдение не способно, но оно может сократить его масштабы.

#### **4. Коридоры**

Необходимо оборудовать камерами коридоры и кабинеты, в которых расположено дорогостоящее оборудование и учебные пособия.

#### **5. Столовая**

Установленные камеры в столовых позволяют контролировать дисциплину в обеденные перерывы, а также позволяют дисциплинировать сотрудников столовой и сократить случаи воровства.

Школы, лицеи, гимназии – тот случай, когда видеонаблюдение должно быть максимально открытым, поэтому желательно, чтобы изображение на мониторе было видно проходящим мимо школьникам. В некоторых случаях это может удержать от правонарушения.

Рассмотрим основные проблемы, с которыми сталкиваются современные системы видеомониторинга в общеобразовательных учреждениях. Ключевой проблемой является недостаточная оперативность реагирования на критическую

ситуацию, связанная с задержкой в отображении и передаче информации. Также могут быть сложности с высокой стоимостью необходимого оборудования, проблемы с совместимостью с другими системами, влияние силовых линий на качество сигнала, повышение требований к квалификации обслуживающего персонала.

Оптимизировать систему видеонаблюдения можно путем комплексного подхода при ее создании. Комплексный подход включает этапы концептуального проектирования, рабочего проектирования и непосредственно, процессы внедрения и эксплуатации.

Концептуальное проектирование включает в себя анализ уязвимости объекта, анализ возможных криминальных угроз, строительные особенности объекта, вид охраны, уязвимые места, класс защиты объекта. На основе предпроектного осмотра, наличия минимальных требований от заказчика формируются требования ко всей системе, которая индивидуально проектируется под каждый объект. Применительно к объекту начального и среднего образования важным является выполнение требований по оснащению системами видеонаблюдения территории и периметра объекта, главного и запасных входов, всех помещений на усмотрения заказчика. Система видеомониторинга должна:

- в случае тревоги передать оператору изображение с охраняемой зоны;
- работать в автоматизированном режиме;
- архивировать данные и предоставлять оперативный доступ к данным;
- эффективно работать в составе интегрированной системы безопасности;
- функционировать круглосуточно;
- емкость архива должна составлять не менее 7 суток в режиме реального времени, архивирование и хранение данных в течении 30 дней.

Оборудование, устанавливаемое в помещениях, должно функционировать при температуре от + 10 до + 40 градусов, оборудование вне помещений должно функционировать от -40 до + 40 градусов, иметь позонно настраиваемый детектор движения, работать по сети.

Применяются сетевые видеокамеры (поворотные купольные, управляемые) с поддержкой питания PoE, скорость передачи данных 7,5 Мбит/С, кадровая скорость 30-60 кадров секунду, скорость записи 6 к/с для наблюдения за периметром и объемами помещений, 9-12 к/с – для фиксации действий персонала и учащихся, 15-25 к/с – для регистрации быстро меняющихся процессов.

Электропитание основное осуществляется от сети 220В, резервное питание - от сети переменного тока напряжением 220 В (независимый фидер) либо аккумуляторных батарей.

Бесперебойное питание должно обеспечиваться не менее 24 часов, максимально – до двух недель.

Пример структурной схемы видеомониторинга, разработанной для выбранного объекта образовательного учреждения, представлен на рисунке.

Спроектированная на основе данной схемы система видеомониторинга обеспечивает выполнение требований технического задания в соответствии со спецификой защищаемого объекта.

### **Выводы**

1. Разработаны требования к функционалу, наличию видеоаналитики, глубине архива и обязательным местам установки камер в зависимости от категории объекта.
2. Исследованы основные принципы и сформулированы требования к построению системы видеонаблюдения на объекте 2-го класса защиты.
3. Разработана структура и рассмотрены режимы функционирования автоматизированной видеосистемы, обеспечивающей приём видеoinформации о

состоянии объекта мониторинга, её обработку, запись и передачу в экстренные службы реагирования (рисунок).

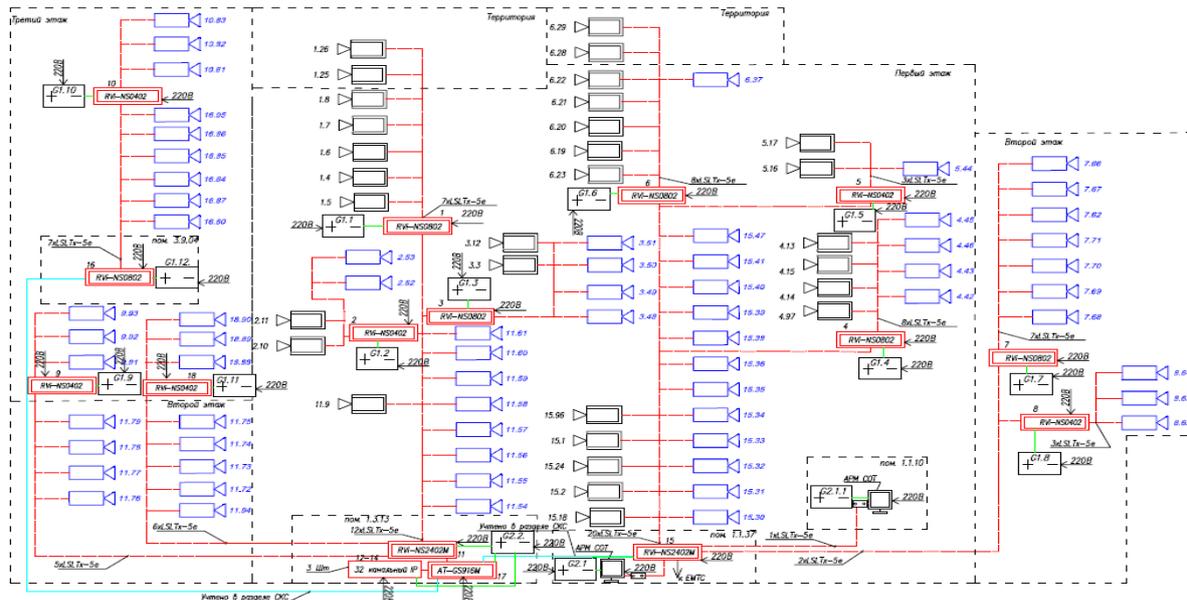


Рисунок. Структурная схема системы видеомониторинга

## Литература

1. Нормативные требования к системе видеонаблюдения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eozarov.ru/regulatory-requirements-to-the-system-of-cctv/> (дата обращения: 05.03.2020).
2. Судебные и нормативные акты РФ. Приложение 16. Технические требования к системе видеонаблюдения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sudact.ru/law/vremennye-edinye-trebovaniia-k-tekhniceskim-parametram-segmentov/prilozhenie-16/> (дата обращения 06.03.2020).
3. Видеоанализ-2011. Выдающийся опыт и технологии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://secuteck.ru/articles2/videonabl/videoanaliz2011/> (дата обращения: 05.03.2020).
4. Иванов В.А., Киручик С.В., Орлов С.И. Пространственно-временной анализ видеопоследовательностей для обнаружения оставленных предметов. М.: Автометрия. 2011. 47 с.
5. Математические методы распознавания образов // 15-я Всероссийская конференция. Сб. научных трудов. 2012. Ч.1. С. 110-116.



**Феоктистова Дарья Андреевна**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы №42901,  
направление подготовки: 12.04.02 – Оптико-цифровые системы,  
e-mail: feoktistova.dariafeok@yandex.ru



**Демин Анатолий Владимирович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор  
направление подготовки: 12.04.02 – Оптико-цифровые системы,  
e-mail: avdemin@itmo.ru

УДК 535.217, 776.3, 776.4

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОТОЛИТОГРАФИИ ДЛЯ КЕРМЕТА И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ**

**Д.А. Феоктистова**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Демин**

### **Аннотация**

Работа посвящена исследованию процесса фотолитографии для конструкции кермета, обзору преимуществ использования данного материала для получения рисунка штриховой миры, выявлению предполагаемых характеристик в результате выполнения технологического процесса.

### **Ключевые слова**

Фотолитография, кермет, конструкция кермета, получение рисунка, шкалы и сетки.

В оптике широкое применение получили такие элементы как «шкалы и сетки». Это детали оптических приборов с нанесенным на них изображением мерной сетки или шкалы, которые, в свою очередь, помогают в проведении точных измерений различных характеристик исследуемых объектов.

Рассмотрим технологический процесс и предполагаемые характеристики на примере штриховой миры (используется для контроля разрешающей способности), изображенной на рисунке.

Характеристики:

- разность оптических плотностей фона и прозрачных штрихов – 2,5;
- предельное отклонение значения размера базы от номинала – не более  $\pm 0,25\%$ ;
- коэффициент пропускания – не менее 0,9 [1].

Стандартная технология изготовления штриховой миры предусматривает использование фотоэмульсии для нанесения рисунка на подложку. Однако, при использовании в технологии такого материала как кермет, предполагается получение

конструкции с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Оптические характеристики, приведенные ранее, не будут уступать характеристикам, полученным при использовании стандартной технологии с использованием фотоэмульсии.

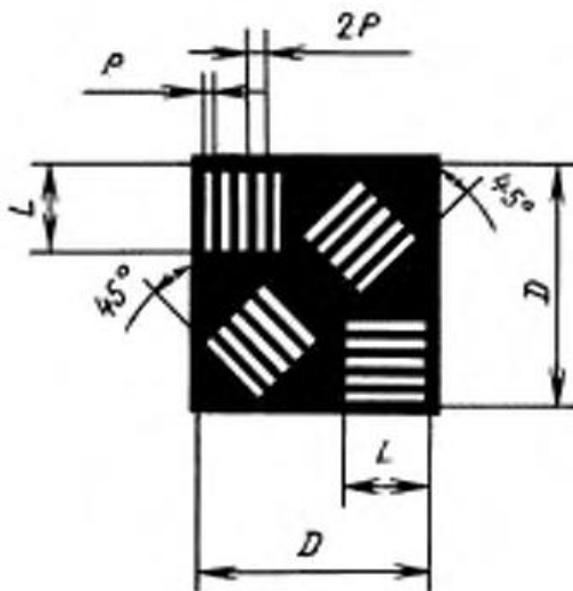


Рисунок. Пример штриховой миры

Кермет – это материал, представляющий собой совмещений одной или нескольких фаз с металлами и сплавами металлов, имеющих малую растворимость фаз. Они сочетают в себе свойства керамики (высокая прочность, тугоплавкость, жаропрочность) и металлов (пластичность, теплопроводность).

Температурный предел применения кермета определяют температура плавления используемого металла. Такие металлы как Si, Ti, Co, Ni, Cr могут позволить создать кермет с рабочей температурой близкой к 1000°C) [2].

Можно сделать вывод о том, что преимущество использования в технологии кермета состоит в следующем:

- материал обладает высокой прочностью;
- способен работать в высоком температурном диапазоне;
- обладает хорошей адгезией при правильной технологии.

### Получение рисунка

Получение рисунка представляет собой сложный процесс взаимосвязанных этапов, адаптированных под выбранную конструкцию кермета. Предварительно на поверхности детали формируется система состоящая из чередующихся слоёв металла и диэлектрика (порядок следования, толщины и оптические постоянные слоёв определяют оптические свойства конструкции – оптическую плотность, низкий коэффициент отражения), реализуемая конструкция представляет из себя необходимый по оптическим и физико-механическим свойствам кермет. Затем рисунок штриховой миры выполняется с помощью процесса фотолитографии, стандартно состоящий из следующих этапов:

- подготовка поверхности к нанесению фоторезиста (в данном случае предполагает очищение подложки от загрязнений и улучшение адгезии фоторезиста);
- нанесение фоторезиста (в ходе данной работы используется такой метод как центрифугирование – подложка закрепляется на центрифуге, затем после нанесения

нескольких капель фоторезиста раскручивается с определенной скоростью (опытным путем была выбрана скорость 2000 об/мин));

– сушка фоторезиста (оптимальна температура ~70-90°C);

– совмещение с фотошаблоном и экспонирование. Экспонирование – процесс облучения светочувствительного слоя (фоторезиста) световым потоком;

– проявление и удаление фоторезиста (для позитивных фоторезистов проявление предполагает получение рисунка с помощью растворов неорганических соединений с щелочными свойствами, например, КОН, NaOH, для перевода продукта деструкции полимера в растворимую фазу);

– травление (в данной работе использованы жидкостные методы травления благодаря их удобству и простоте исполнения) используются эффективные для кермета травители;

– чистка (предполагает удаление остатков фоторезиста и других растворителей) [3-5].

### Литература

1. ГОСТ 15114-78. Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. Введен 01.01.1979. С. 6.
2. Балкевич В.Л. Техническая керамика // Учеб. пособие для вузов. 1968. №2. С. 89.
3. Кручинин Д.Ю., Фарафонтова Е.П. Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей. // Учеб. пособие для вузов. 2014. С. 9–13.
4. Зеленцов С.В., Зеленцова Н.В. Современная фотолитография // Учеб. пособие для вузов. 2006. С. 12–28.
5. Ануфриев Л.П., Бордусов С.В. Технология интегральной электроники. // Учеб. пособие для вузов. 2009. С. 289–319.



**Фомин Дмитрий Игоревич**

Год рождения: 1996  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы №42081,  
направление подготовки: 12.04.02 – Опотехника,  
e-mail: dfomin53@gmail.com



**Мараев Антон Андреевич**

Год рождения: 1887  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., аспирант,  
e-mail: aamarayev@itmo.ru

УДК 629.052.5

## **СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Д.И. Фомин**

**Научный руководитель – к.т.н., ассистент А.А. Мараев**

### **Аннотация**

В данной работе будут рассмотрены методы автоматического управления в системах управления посадкой и обнаружения препятствий квадрокоптерами при помощи фазовых и импульсных дальномеров.

### **Ключевые слова**

Квадрокоптеры, автоматизация, дальномеры, управление, посадка, обнаружение препятствий.

Все большую популярность получают беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в виде мультикоптеров, а чаще – квадрокоптеров, представляющих из себя платформу с четырьмя роторами, винты которых вращаются в разных направлениях для разных диагоналей [1].

Для работы беспилотных летательных аппаратов без оператора необходима система обнаружения препятствий на пути их следования, которая может быть реализована на основе дальномеров. Для обнаружения препятствий излучение должно быть достаточной интенсивности, чтобы после отражения от препятствия на заданном расстоянии это излучение было различимо на фоне шума, необходимое для изменения направления движения, и зависит от скорости полета и маневренности дрона [2].

Импульсный дальномер посылает импульсы через равные промежутки времени и рассчитывает дальность до объекта, через скорость света и время которое свет прошел расстояние до объекта и вернулся (рис. 1). Расстояние определяется по формуле:

$$L = ct/2n \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние до объекта  $c$  – скорость света в вакууме  $t$  – время прохождения импульса до цели и обратно  $n$  – показатель преломления среды, в которой распространяется излучение.



Рис. 1. Принцип действия импульсного дальномера

Фазовый дальномер постоянно излучает промодулированный сигнал, и по разности фаз интенсивностей излучаемого и полученного сигнала в данный момент времени определяет дистанцию. Синим цветом (рис. 2) показана мощность, подводимая к источнику излучения, красным — мощность, получаемая приемником.

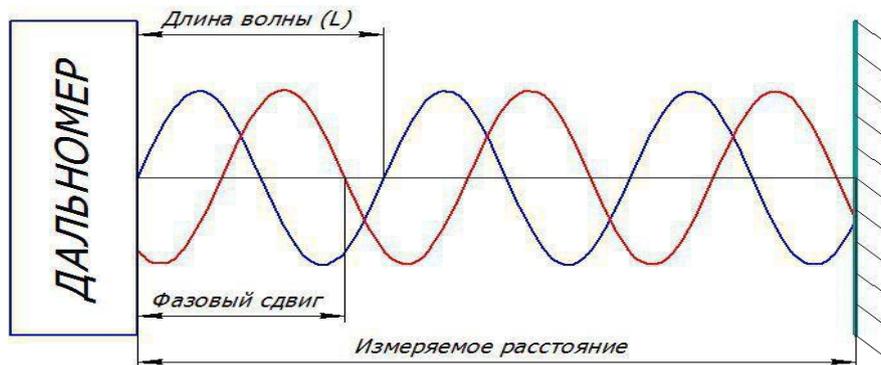


Рис. 2. Принцип действия фазового дальномера

Отраженное от объекта излучение принимается фотоприемником, и его фаза сравнивается с фазой опорного сигнала. Наличие задержки при распространении волны создает сдвиг фаз, который и измеряется дальномером. Расстояние определяется по формуле:

$$D = \frac{c}{2f} \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света,  $f$  – частота модуляции лазера,  $\varphi$  фазовый сдвиг.

Дальность действия фазового дальномера не может превышать дальность, заданную частотой модуляции сигнала, в отличие от импульсного дальномера, дистанция работы которого не ограничена ничем, кроме дальности распространения излучения и его изначальной мощности. Однако импульсный дальномер имеет меньшую точность, так как она зависит от точности встроенного таймера, характеристик среды и точности расчета, в отличие от фазового дальномера, точность которого определяется дискретностью приемника.

Для однозначного определения положения препятствия относительно дрона необходимо использовать два типа приемников – высокочастотный фотодиод, для

определения расстояния до препятствия, и линейку приемников, для определение углового положения [3, 4]. Для уменьшения веса конструкции можно установить оба приемника за одной цилиндрической линзой, таким образом на оба приемника будет поступать одинаковая информация и их проще будет синхронизировать между собой.

Расстояние до препятствия будет являться полярным радиусом, а направление на препятствие- полярным углом. При необходимости эти координаты можно пересчитать в декартовы координаты. Необходимость определяется характером движения: в случае изменения направления по средствам изменения угла рысканья удобно использовать полярные координаты, а в случае необходимости более точного управления по средствам тангажа и полетов в бок удобней перейти в декартовы координаты. Безопасная зона, в которой не должно быть препятствий показана на рис. 3.

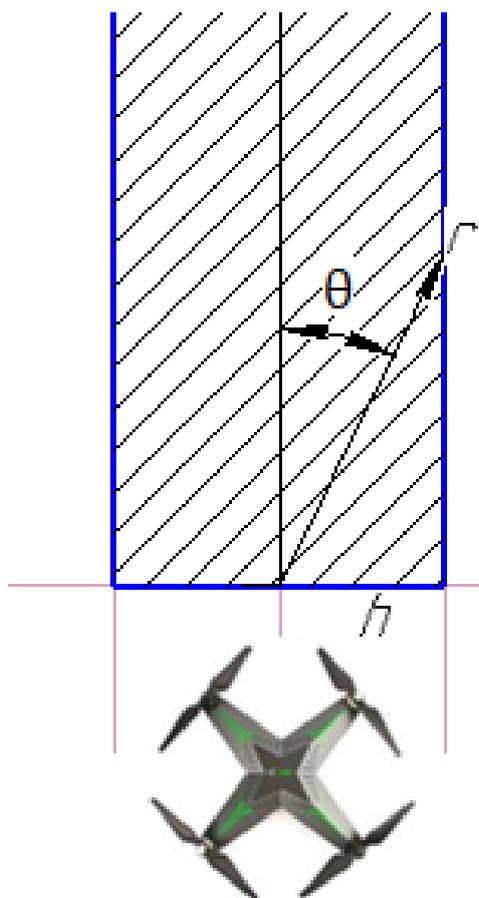


Рис. 3. Безопасная зона

Во время автоматического полета дрона могут произойти ситуации, при которых в качестве препятствий будет выступать несколько объектов, или объекты занимающие на линейке существенное количество пикселей (протяженные препятствия). В таком случае можно выделить несколько алгоритмов действий

1. Наличие только одного препятствия.
2. Наличие нескольких препятствий на разном расстоянии от дрона.
3. Наличие нескольких препятствии на одном расстоянии от дрона.
4. Переход в ручной режим управления.

Рассмотрим подробнее каждый из алгоритмов. Стандартный случай режима работы дрона, при наличии только одного препятствия был приведен в предыдущем разделе: на линейке приемников один пик, дальномер однозначно показывает расстояние. При работе в этом режиме маневрирование заключается в повороте

траектории полета дрона, в сторону противоположенную препятствию, до того, когда препятствие не выйдет из безопасной зоны (рис. 4).

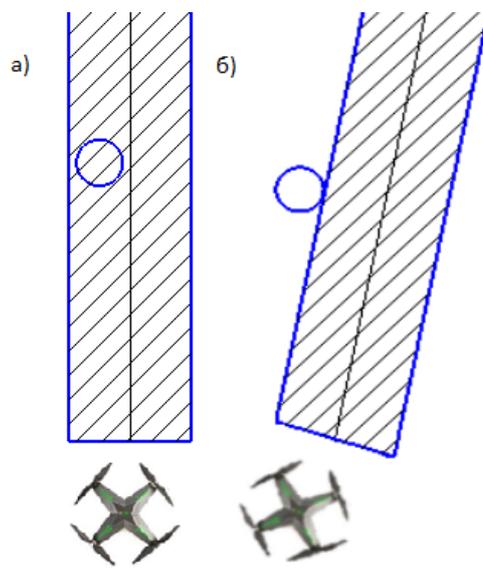


Рис. 4. Одно препятствие

В случае нескольких пиков на линейке приемника показания дальномера не позволят однозначно определить расстояние до каждого из них, в этом случае можно уменьшить интенсивность источника (рис. 5), таким образом дистанция обзора снизится, а значит в поле зрения останутся объекты находящиеся на меньшем расстоянии, и если такой объект будет единственным то алгоритм облета препятствий сведется к предыдущему. Снижать интенсивность можно до определенного порога, такого чтобы либо дистанция обзора была определена габаритными размерами дрона или груза, что больше (переход к следующему алгоритму), либо отраженный сигнал был различим относительно фона и шума, на обоих приемниках.

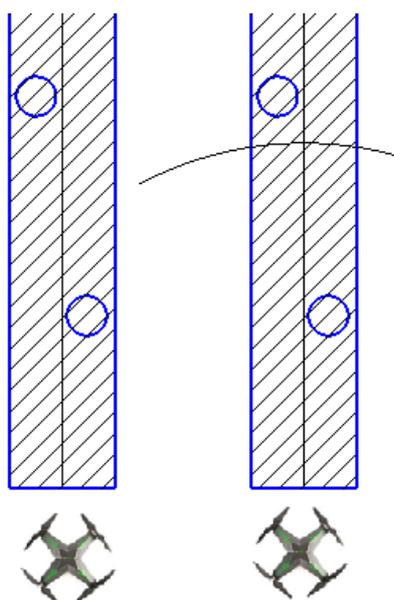


Рис. 5. Несколько препятствий на разном удалении

В случае если придельное снижение интенсивности не принесло результатов, то происходит переключение на более точный алгоритм маневрирования. Интенсивность подсветки обзора в таком случае выберется в пределах от одного до двух габаритных размеров дрона или груза. При переходе на этот алгоритм дрон зависает в воздухе и маневрирует в направлении, параллельном препятствиям, так чтобы найти положение, при котором не будет препятствий в безопасной зоне (рис. 6), в зоне видимости, после обнаружения такого положения дрон пролетает мимо препятствий вне безопасной зоны и алгоритм повторяется заново.

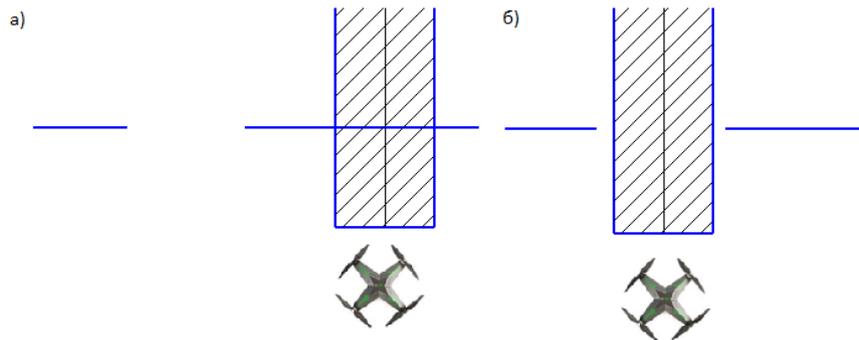


Рис. 6. Несколько протяженных препятствий

В случае если алгоритм точного маневрирования не помог, или если фон и шум стали выше различных препятствий на дистанции обзора в 5 метров, хотя они были видны при больше подсветке, то необходимо вмешательство оператора, в этом случае дрон передает сигнал на команды пункт и приземляется до перехода в ручной режим.

Для автоматического полета дрона необходимо обнаруживать препятствия на пути следования, а так же боковой и задний обзор, для детектирования подвижных препятствия, движущихся в направлении дрона, и кругового обзора препятствий в условиях ограниченного пространства [5]. Таким образом, для корректной работы системы управления необходим обзор в 360°, который может быть обеспечен 4 элементами обнаружения препятствий, один из которых (направленный вперед) должен иметь возможность изменять максимальную дистанцию обзора в диапазоне от 1-2 габаритных размеров дрона до 10 метров.

Каждый дальномер показывает расстояние от дрона до препятствия или если не получает обратный сигнал, то в этом направлении нет препятствий в зоне действия дальномера. При обнаружении препятствия в направлении следования сигнал передается на блок управления БПЛА, который в свою очередь изменяет направление движения, в зависимости от заданного курса и информации с остальных датчиков.

Дистанция работы системы обзора зависит от алгоритма реагирования, описанном выше. Режим по умолчанию предполагает, в случае обнаружения препятствий, отклонение от траектории движения так, чтобы облететь препятствие. Угол отклонения в таком случае зависит от расстояния до препятствия, и его углового положения, относительно центра дрона. Когда речь идет о стационарных препятствиях расстояние до препятствия, в момент его обнаружения, равно максимально дистанции обзора, а максимальный угол поворота определяется по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{0,5h}{d}\right), \quad (3)$$

где  $d$ – максимальная дистанция обзора,  $h$ –габаритный размер дрона.

Средняя скорость полета различна для разных моделей, максимальная на данный момент у спортивных коптеров и достигает 263км/ч рекорд принадлежит модели DRL RacerX. Максимальная скорость наиболее распространенных на рынке дронов не превышает 60-70км/ч, но обычно скорость полета около 40км/ч, или 11м/с.

Так как  $d \gg h$ , то угол поворота незначителен и в соответствии с рис. 6 поворот займет существенно меньше времени, чем время полета до препятствия, таким образом система будет корректно работать при любой дистанции обзора большей 5 метров. примем дистанцию обзора с запасом в 2 раза, тогда  $h=10$  метров.

### Литература

1. Огольцев И.И., Рожнин Н.Б., Шувать В.В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера. Труды МАИ. Выпуск №83.
2. Корнилов В.А. Система управления мультикоптером / Корнилов В.А., Молодяков Д.С., Синявская Ю.А. М., 2012. 512 с.
3. Гибридная система управления малыми беспилотными летательными аппаратами / Власов А.И., Зотьева Д.Е., Евдокимов В.С., Ревзин Г.Г., Феоктистов Д.В. // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 8. С. 15–24.
4. Игнатъев К.В., Пашковский Е.А., Система управления движением квадрокоптера // Научно-технический вестник СПбГЭТУ “ЛЭТИ” 2017. №2.
5. Puls T., Hein A. 3D trajectory control for quadcopter // Intelligent Robots and System (IROS). IEEE/RSJ International Conference on, 2010. P. 640–645.



**Хлынов Руслан Дмитриевич**

Год рождения: 1999

Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,  
студент группы № В3305,

направление подготовки: 12.03.02 – Опотехника,

e-mail: super.ryslan3@yandex.ru



**Рыжова Виктория Александровна**

Год рождения: 1966

Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,

к.т.н., доцент,

e-mail: victoria\_ryz@itmo.ru

УДК 535.513

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРОВИ**

**Р.Д. Хлынов, В.А. Рыжова**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Рыжова**

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

**Аннотация**

В статье рассмотрены методы исследования форменных элементов крови. Приводятся достоинства и недостатки существующих методов измерения уровня гематокрита, определяющего микрофизические показатели и концентрацию форменных элементов в плазме крови. Показана возможность неинвазивного измерения гематокрита опико-электронными методами.

**Ключевые слова**

Форменные элементы крови, гематокрит, методы исследования, бесконтактные измерения, анализ.

**Введение**

Анализ крови человека проводится в целях медицинской диагностики, для выявления соматических отклонений, определения уровня гликемии при сахарном диабете, контроля состояния организма при анемии и травматических кровопотерях, при мониторинге в условиях палат реанимации и интенсивной терапии. Одним из значимых показателей микрофизического состояния крови является концентрация ее форменных элементов (нерастворимых клеток крови), которая определяется уровнем гематокрита [1-3].

В современных условиях внедрения неинвазивных технологий в медицинскую практику перспективным является развитие бесконтактных методов исследования форменных элементов крови. В связи с этим целью данной работы является обзор

существующих методов определения уровня гематокрита и их сравнительный анализ для определения возможности и перспектив реализации оптико-электронных методов *in vivo*.

Объектом исследования является кровь, состоящая из плазмы и форменных элементов (эритроциты, лейкоциты, тромбоциты). Поскольку основной объём форменных элементов составляют гемоглобиносодержащие элементы (эритроциты), гематокрит определяется как процентное отношение суммарного объема эритроцитарной массы к объему цельной крови.

### Обзор клинических методов измерения

Клинические инвазивные измерения гематокрита требуют либо забора крови, либо катетеризации. Традиционно используется метод центрифугирования и методы (радиоиммунохимические, иммуноферментные, иммунолюминесцентные), на основе которых действуют автоматизированные гемоанализаторы для работ с пробами крови. Наиболее распространенным для анализа крови является метод центрифугирования вследствие относительно невысокой стоимости оборудования и возможности исследовать малый объем крови. Недостатки метода: необходимость тщательной подготовки стеклянного капилляра (гематокрита) с кровью из пробы, длительный процесс измерения, относительно высокие погрешности.

При проведении процедур гемодиализа и хирургических операций особенно востребованы неинвазивные технологии определения уровня гематокрита крови. В основном они реализуются кондуктометрическими методами. К ним относятся метод непрерывной импедансной спектроскопии в аппаратах гемодиализа и метод на основе непрерывной регистрации артериального давления и проводимости крови [1].

Метод непрерывной импедансной спектроскопии форменных элементов состоит в измерении диэлектрической проницаемости крови на различных частотах с последующим анализом полученного спектрального распределения импеданса и вычисления значения гематокрита. При этом электроды располагаются непосредственно на подводящей силиконовой трубке гемодиализного аппарата. Достоинства: малое время измерения, возможность проведения онлайн измерений, присутствует графическое представление результатов. Недостатки: высокий температурный дрейф показаний, погрешность в связи с высокой диэлектрической проницаемостью крови и относительно низкой проницаемостью стенок пластиковой трубки.

Метод на основе непрерывной регистрации артериального давления и проводимости крови предполагает установку чувствительных электродов непосредственно на предплечье пациента. Импедансная оценка уровня гематокрита формируется на основе соотношения [1]:

$$\frac{\Delta Y}{\Delta P} = \frac{C}{L^2} \sigma_p (1 - HCT)^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\Delta Y$  – изменение проводимости крови вследствие компрессии,  $\Delta P$  – изменение артериального давления (мм рт.ст.),  $C$  – артериальный COMPLAINT (мкм/мм рт.ст.),  $L$  – расстояние между электродами (м),  $\sigma_p$  – проводимость плазмы крови (см),  $HCT$  – гематокрит (%). Достоинством метода является его оперативность, что позволяет его использовать для экспресс-оценки состояния крови в неотложной помощи и в условиях отделений интенсивной терапии. Недостатки: высокая погрешность в связи с зависимостью результата от расположения электродов на конечности пациента и от индивидуальных особенностей его кожи.

Помимо кондуктометрических известен прошедший клинические испытания неинвазивный метод на основе исследования закономерностей распространения пульсовой волны [2]. Он основан на существенном влиянии вязкости крови и гематокрита на форму механических колебаний, возбуждаемых задним фронтом пульсовой волны магистральной артерии пациента. На двух уровнях конечности пациента устанавливаются емкостные датчики, которые регистрируют пульсовую волну магистральной артерии, определяют ее амплитуду, длительность заднего фронта, время распространения, учитывают систолическое и диастолическое артериальное давление. Оригинальная программа формирует графическое представление результатов непрерывного мониторинга пульсовой волны, на основании которого определяют амплитуду и временной спад пульсовой волны. Расчет вязкости крови гематокрита производят с использованием формул:

$$U = 1,0285^{HCT}, \quad (2)$$

$$HCT = \frac{1,872}{\left( \frac{\Delta t \cdot 66.03}{(A^{-0.41} \cdot P_s \cdot P_d \cdot \frac{T_v}{L})^{-0.2}} \right)}, \quad (3)$$

где  $P_s$  – систолическое артериальное давление (мм рт.ст.),  $P_d$  – диастолическое артериальное давление (мм рт.ст.),  $T_v$  – время распространения пульсовой волны (мсек),  $L$  – расстояние между регистраторами пульсовой волны (см),  $U$  – вязкость крови,  $\Delta t$  – временной спад пульсовой волны (сек),  $A$  – амплитуда пульсовой волны (отн.ед).

Достоинства метода: низкая погрешность в пределах 3%, возможность автоматизированной обработки данных. Недостатки метода: существенная зависимость результатов от места установки датчиков и от сложных функциональных состояний миокарда и сосудов пациента.

### Опико-электронные методы исследования

В настоящее время существует большой интерес к бесконтактным опико-электронным методам исследования, которые, обладая высокой информативностью, позволят проводить анализ нескольких параметров состояния крови, характеризующих ее форменные элементы.

В связи с развитием систем технического зрения, активно внедряются в медицинскую практику методы на основе анализа изображений. Рассматриваемый метод основан на визуализации результатов низкокогерентной интерферометрии [3]. Метод используется для исследования гематокрита в зависимости от профилей поглощения и рассеяния излучения сосудами сетчатки глаза. В методе используется источник поляризованного света для освещения сосудистой сети, в то время как скрещенный по отношению к плоскости поляризации падающего света анализатор расположен в фокальной плоскости детектирования. Глубина проникновения фотонов в кровяной сосуд обратно пропорциональна коэффициенту рассеяния, который в свою очередь коррелирует с гематокритом. Это создает профиль глубины отражательной способности для каждого отдельного кровеносного сосуда.

Метод находится на стадии экспериментального исследования. В настоящее время реализуется с помощью систем оптической когерентной томографии для целей офтальмологии. Преимущества: полностью неинвазивный, возможность непрерывного мониторинга. Недостатки: сложный процесс визуализации рассеянного излучения, длительный процесс измерения.

В целях повышения эффективности исследования форменных элементов крови и точности измерения их параметров производят совместную обработку результатов, полученных методами, отличающимися высокой чувствительностью к разным параметрам крови. Поскольку гемоглобин, содержащийся в эритроцитах, является самым сильным хромофором крови, наиболее широко сейчас распространены спектральные методы: спектроскопия поглощения или комбинационного рассеяния. Часто они используются совместно с другими методами исследования (акустическим или интерферометрическим), что позволяет проводить одновременные измерения нескольких анализов крови, включая гематокрит и гемоглобин.

Так, известен метод прямого мониторинга интенсивности излучения, поглощенного форменными элементами крови в биоткани [3]. Возможны две реализации метода. В первом случае коэффициент пропускания биоткани, различный для разных хромофоров крови на длине волны излучения 905 нм, оценивается через эффективную оптическую длину пути. Прошедшее биоткань излучение модулируется сигналом от акустических преобразователей (сонометров), которые фиксируют объемную толщину сегмента ткани и небольшие изменения этой толщины от расширения кровеносных сосудов во время систолы. Рис. 1(а) иллюстрирует реализацию метода, на рис. 1(б) показаны временные зависимости интенсивности света и изменения оптической длины пути во время систолической пульсации.

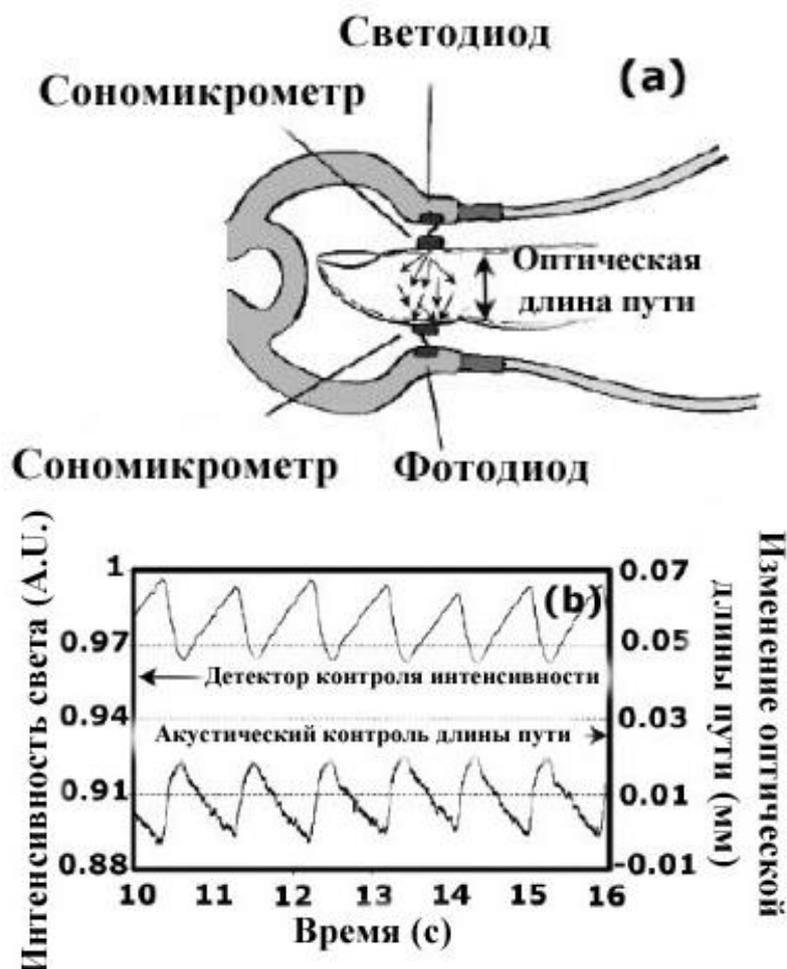


Рис. 1. Схема сочетания оптико-электронного и акустического методов для контроля состояния крови (а) и диаграммы изменения интенсивности света, соответствующего изменению оптической длины пути (б)

Альтернативный метод коррекции оптической длины пути при измерении коэффициента пропускания форменных элементов крови предполагает использование в схеме двухспектрального источника излучения. В то время как видимое излучение взаимодействует с артериальными сосудами, ИК-излучение взаимодействует только с венами и мягкими тканями. В результате фотоны, достигающие фотоприемника после прохождения через артериальный сосуд, подвергаются импульсной модуляции по интенсивности от изменения диаметра сосуда (и соответствующей длины взаимодействия с цельной кровью), в то время как фотоны, обходящие артериальный сосуд, остаются постоянными во время пульсирующих колебаний. Отношение пульсирующих переменных сигналов к постоянным сигналам затем используется для минимизации помех от других компонентов крови.

Преимущество рассмотренных комбинированных методов: достаточно высокая точность при определении величины гематокрита в стационаре по одному показанию (3-5%). Недостаток: необходимость калибровки с использованием инвазивных методов.

Сочетание спектрального и фазового подхода к обработке результатов измерений свойственно для низкокогерентного метода измерения гематокрита, который находится в стадии исследования и реализуется *in vitro* в лабораторных условиях [4]. Измерительная система изображена на рис. 2 и состоит из низкокогерентного широкополосного источника, интерферометра Фабри-Перо и оптического процессора.



Рис. 2. Базовая установка низкокогерентной интерферометрии

Схема основана на совместной обработке фазовой и спектральной составляющих сигнала, поступающих от разных оптических процессоров: второго интерферометра и спектрометра. Итоговый сигнал может быть выражен с помощью формулы:

$$I_{out}(\nu) = S(\nu) [1 + V_0 \cos(\Delta\varphi(\nu))], \quad (4)$$

где  $S(\nu)$  – спектральное распределение источника света,  $V_0$  – видимость измеряемого сигнала,  $\Delta\varphi(\nu)$  – разность фаз между интерферирующими лучами, которая рассчитывается по уравнению:

$$\Delta\varphi(\nu) = \frac{2\pi\nu\delta}{c}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – разность оптических путей,  $c$  – скорость света в вакууме.

Главными преимуществами метода являются: относительно простая конфигурация, низкая стоимость, высокое качество измеряемых оптических сигналов,

и устойчивость к изменениям поляризации оптического сигнала. Недостатки: сильное влияние параметров источника с гауссовым распределением спектральной интенсивности на метрологические параметры, сложность измерения крови с экстремальным значением гематокрита, ограниченная температура крови.

Достаточно высоких результатов возможно добиться при совместной обработке данных, полученных применением поляризационных методов и методов измерения параметров индикатрисы рассеянного биотканью излучения [5]. В настоящее время поляризационные методы занимают одно из ведущих мест среди оптических методов диагностики биотканей благодаря их высокой информативности, а также высокой чувствительности поляризационных характеристик к оптическим свойствам, геометрии и ориентации эритроцитов крови.

Рассеяние оптического излучения кровью обусловлено наличием в ней большого числа случайно распределенных в объеме рассеивающих центров, каковыми являются форменные элементы. Процесс рассеяния приводит к изменениям в пространственном распределении интенсивности света. Поэтому одной из основных характеристик при изучении светорассеяния является индикатриса, определяющая интенсивность света как функцию углового распределения интенсивности света от концентрации рассеивающих частиц – эритроцитов, а также от толщины слоя крови.

Непосредственно измеряемыми оптическими характеристиками крови являются в данном случае коэффициенты углового рассеяния и ослабления излучения, форма индикатрисы рассеяния, коэффициенты линейной поляризации и степени деполяризации излучения. Применение регрессионного анализа при обработке результатов измерений позволяет определить комплекс микрофизических параметров форменных элементов крови (функция распределения по размерам, концентрация, показатель преломления), параметров формы (средний объем и средняя площадь поверхности) популяций эритроцитов.

Использование регрессионных соотношений позволяет минимизировать погрешность метода и оценить влияние количества измеряемых оптических и поляризационных характеристик на точность определения параметров эритроцитов. Показано, что погрешность определения данных параметров с использованием регрессионных соотношений не превышает нескольких процентов (например, 2,5 % для концентрации эритроцитов) [5].

### **Выводы**

Наиболее распространенными в медицинской практике являются инвазивные методы определения состояния крови. Сложность их реализации для оперативного контроля параметров форменных элементов крови, высокие затраты на оборудование и подготовку проб ведут к развитию бесконтактных методов. Клиническое применение неинвазивных методов, основанных на контроле электрической проводимости крови или параметров пульсовой волны, имеет ограничения, связанные с длительным процессом измерений, относительно высокими погрешностями, существенной зависимостью результата от индивидуальных особенностей кожи, возраста и пола пациента.

Обзор методов исследования форменных элементов крови посредством измерения и контроля уровня гематокрита выявил возможность реализации бесконтактных оптико-электронных методов, которые обладают высокой чувствительностью, информативностью, потенциальной точностью, постоянно развиваются и совершенствуются. К настоящему времени качественная и количественная картина распространения света в биотканях может быть описана достаточно полно, что позволяет реализовывать ту или иную стратегию оптической диагностики крови, терапевтического или хирургического воздействия.

Повышение эффективности опико-электронных методов связано с совместной обработкой результатов, полученных от применения нескольких методов, направленных на одновременное измерение разных параметров форменных элементов крови. Анализ поляризационных и угловых характеристик рассеянного биотканями излучения в ряде случаев позволяет получить качественно новые результаты исследования крови, которые могут использоваться в медицине.

### Литература

1. Hradetzky D., Trebbels D., Zengerle R. Capacitive on-line hematocrit sensor design based on Impedance Spectroscopy for use in hemodialysis machines. The 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS Minneapolis, Minnesota, USA, September 2–5, 2009.
2. Царев О.А., Прокин Ф.Г., Мащенко Ю.В. и соавт. Обоснование неинвазивного способа мониторинга вязкости крови и гематокрита. Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. том 6. №1ю с. 194-198.
3. Grawford G., Jay G., McMurdy J. and Suner S. Photonics-bases In Vivo hemoglobin monitoring and clinical relevance. WILEY\_VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim. 2009.
4. Jedrejska-Szczerska M., Gryba M., Kruczkowski M. Low-coherence method of hematocrit measurement, Proceeding of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. November 2014. pp. 387–391.
5. Kugeiko M.M., Smunev D.A. Estimation of the microphysical parameters for native red blood cells based on the measured optical properties of scattered radiation. Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform. 2016. No. 2. P. 73–78 (in Russ.).



**Яковлев Александр Игоревич**

Год рождения: 1998  
Университет ИТМО, факультет прикладной оптики,  
студент группы № В5408,  
направление подготовки: 12.05.01 – Электронные  
и оптико-электронные приборы и системы,  
специального назначения,  
e-mail: mr\_alex211@mail.ru



**Тимофеев Александр Николаевич**

Год рождения: 1945  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., с.н.с., тьютор,  
e-mail: timofeev@itmo.ru

УДК 535.317.1

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО  
ПРОГИБОМЕРА С ЕДИНЫМ МАТРИЧНЫМ ПОЛЕМ**

**А.И. Яковлев, А.Н. Тимофеев**

**Научный руководитель – к.т.н., с.н.с. А.Н. Тимофеев**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

Среди распределенных оптико-электронных систем мониторинга состояния объектов свое место занимают оптико-электронные прогибомеры для многоточечного контроля профиля плавучего дока. Проектирование таких систем имеет особенности вследствие необходимости оптимизации размещения реперных меток и специфических условий эксплуатации. Предлагается описание взаимосвязей параметров оптической схемы приемного блока с пространственными координатами реперных меток и диапазонами их перемещений. Описаны особенности конструктивного решения приемного блока.

**Ключевые слова**

Контроль профиля, метод створный, координаты пространственные, схемы инвариантные, согласование полей.

**Введение**

При подъеме судна из воды в плавучих доках возникают значительные прогибы, поэтому необходимо контролировать величину деформации корпуса дока. Указанные деформации не должны превышать предельно допустимых значений. Такой контроль осуществляется двухканальными оптико-электронными системами контроля прогиба с двумя реперными метками [1, 2]. Однако, во-первых, в ранее разработанных схемах количество контрольных точек недостаточно для создания более точного профиля дока и, во-вторых, в процессе длительной эксплуатации при применении двух матричных

полей для анализа положения реперных меток базовые направления подвержены рассогласованию. Применение инвариантных к поворотам оптических элементов схем с многоточечным контролем профиля корпуса дока [3, 4] и одним матричным полем позволяет ослабить влияние указанных недостатков. Поэтому **актуальность** приобретают исследования особенностей построения новых схем оптико-электронных прогибомеров плавучих доков, ослабляющих влияния указанных явлений.

В связи с этим **целью работы** являлось исследование особенностей построения оптико-электронного прогибомера с единым матричным полем для многоточечного контроля профиля плавучего дока для различных схем размещения контрольных точек и изменяющихся условий эксплуатации.

### Основная часть

Проанализировав различные оптические системы отклонения лучей по материалам статей авторов [5-7], в разработанной схеме оптико-электронного прогибомера с единым матричным полем (рис. 1) предложено применить оптическую систему отклонения лучей СОЛ, состоящую из пентапризмы с крышей БкП-90 и призмы АР-90.

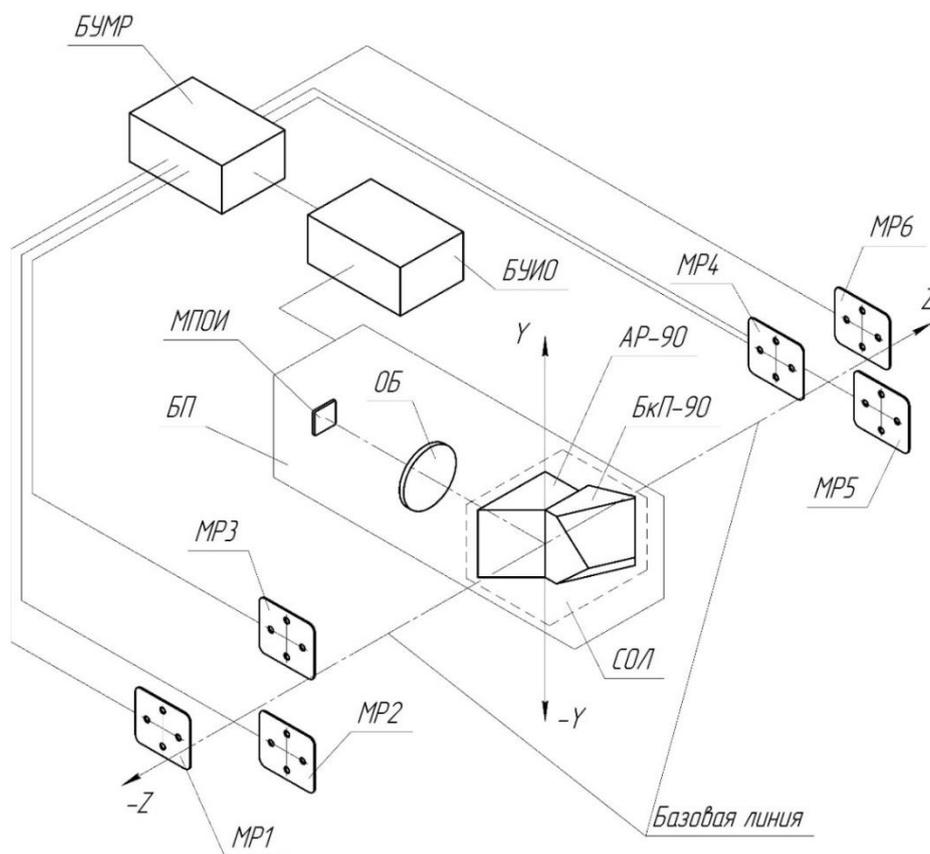


Рис. 1. Схема прогибомера многоточечного контроля

В оптической схеме прогибомера потоки излучения от реперных меток МР1 – МР3 и МР4 – МР6, которые установлены в соответствующих оптических каналах и размещены в контрольных местах, с помощью СОЛ собираются объективом ОБ в плоскости матричного приемника оптического излучения МПОИ.

При этом в предложенной схеме величина прогиба  $H_i$  в зависимости от номера метки рассчитывается по формуле:

$$H_i = \frac{\delta h_i + \delta h_{i+3}}{2},$$

где  $\delta h_i$  и  $\delta h_{i+3}$  – изменение положений двух сопряженных МР, расположенных на равных расстояниях от приемного блока БП на доке.

В предложенной схеме пентапризма БкП-90 пропускает половину пучков излучения в горизонтальной плоскости от МР1 – МР3, вследствие этого на МПОИ наблюдаются изображения МР1 – МР3. С противоположной стороны призма АР-90 пропускает половину пучков излучения в горизонтальной плоскости от МР4 – МР6, вследствие этого на МПОИ можно наблюдать соответственно изображения МР4 – МР6. Такая конфигурация призмного блока обеспечивает инвариантность оптического прогибомера к поворотам БП [5].

Блок управления и обработки БУИО определяет положение МР по геометрическому центру изображений МР. БУИО имеет интерфейс подключения к внешним устройствам для передачи информации на дисплей и оповещения о критической ситуации и регулирует работу блока управления метками реперными БУМР.

Для надежного обнаружения МР в поле зрения БП предложено рабочую часть МР реализовывать четырьмя расположенными на известном расстоянии  $p$  полупроводниковыми излучающими диодами ПИД.

Для исключения перекрытий МР друг другом в поле зрения необходимо смещать БП относительно линии расположения МР по двум координатам (рис. 2). В общем случае точка  $O$  – первоначальное положение БП, с которым связана система координат; точка  $A$  – первая МР, расположенная на расстоянии  $z_1$  от точки  $O$ . Далее МР располагаются на одной линии вдоль направления  $Z$ .

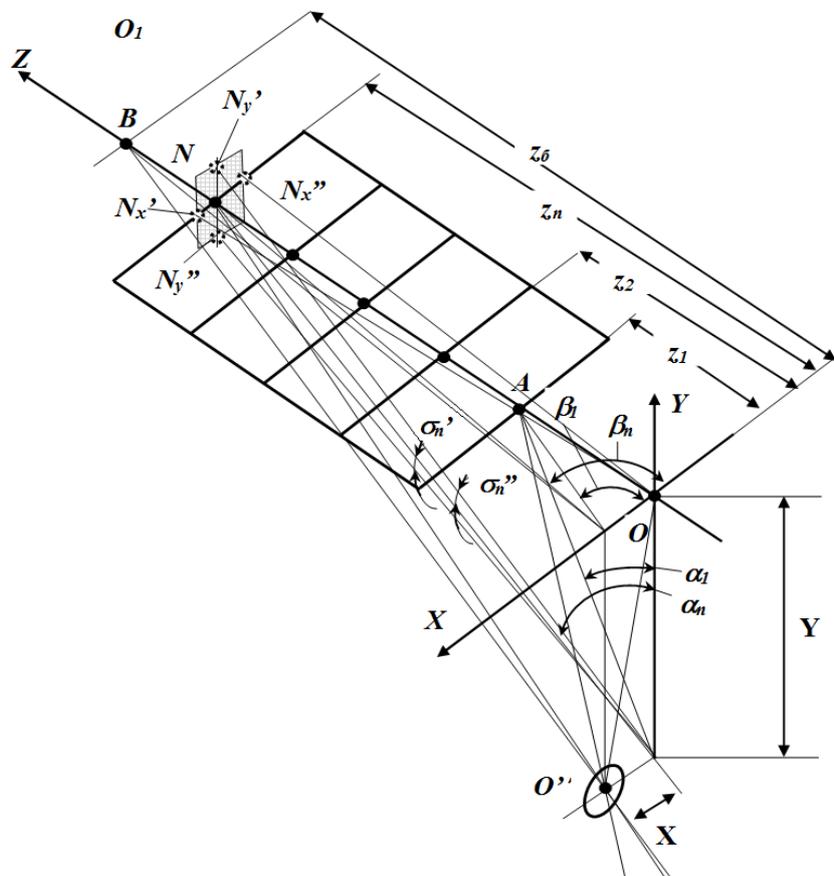


Рис. 2. Контроль положения МР при двухкоординатном смещении БП

На рис. 2 представлены:  $\sigma'_n$  – угловое смещение МР вдоль оси X в отрицательном направлении;  $\sigma''_n$  – угловое смещение метки вдоль оси X в положительном направлении;  $\alpha_n$  – центральный угол поля зрения МР в плоскости OYZ;  $\beta_n$  – центральный угол поля зрения МР в плоскости OXZ;  $z_n$  – расстояние до n-й метки.

Плоскость анализа отображений меток (на рис. 2 не показана) в БП располагается параллельно направлению перемещения БП на расстоянии  $a'$  от задней главной плоскости объектива БП.

Для эффективной работы системы необходимо, чтобы отображения полей перемещений меток в плоскости анализа не пересекались для соседних меток. В этом случае критерием выбора значения координаты Y положения БП будет условие непересечения угловых полей перемещений меток:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\alpha_2 - \gamma'_2) \geq (\alpha_1 + \gamma''_1) \\ \dots \\ (\alpha_{n-1} - \gamma'_{n-1}) \geq (\alpha_{n-2} + \gamma''_{n-2}) \\ (\alpha_n - \gamma'_n) \geq (\alpha_{n-1} + \gamma''_{n-1}) \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\gamma'_n$  – угловое перемещение МР вдоль оси Y в положительном направлении;  $\gamma''_n$  – угловое перемещение МР вдоль оси Y в отрицательном направлении:

$$\alpha_n = \arctg \frac{z_n}{Y}; \quad \gamma'_n = \alpha_n - \arctg \frac{z_n}{Y + h'_n + 0.5p}; \quad \gamma''_n = \arctg \frac{z_n}{Y - h''_n - 0.5p} - \alpha_n.$$

Исходя из условия получено, что значение координаты Y положения БП, при котором отображения полей перемещений на матричном поле анализа для соседних меток не пересекаются, на основании условия (1) должно удовлетворять выражению:

$$Y_{n,n-1} \geq \frac{(h''_{n-1} + 0.5p)z_n - (h'_n + 0.5p)z_{n-1}}{z_n - z_{n-1}}, \quad (2)$$

где  $h'$  и  $h''$  – линейное перемещение МР вдоль оси Y ( $NN_{y'} = h'$ ,  $NN_{y''} = h''$ ).

Аналогично можно записать условия непересечения полей перемещений МР и для горизонтального смещения БП:

$$\left\{ \begin{array}{l} (\beta_2 - \sigma'_2) \geq (\beta_1 + \sigma''_1) \\ \dots \\ (\beta_{n-1} - \sigma'_{n-1}) \geq (\beta_{n-2} + \sigma''_{n-2}) \\ (\beta_n - \sigma'_n) \geq (\beta_{n-1} + \sigma''_{n-1}) \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\text{где } \beta_n = \arctg \frac{z_n}{X}; \quad \sigma'_n = \arctg \frac{z_n}{X - b'_n - 0.5p} - \beta_n; \quad \sigma''_n = \beta_n - \arctg \frac{z_n}{X + b''_n + 0.5p}.$$

Тогда координата X смещения БП определяется из следующего выражения:

$$X_{n,n-1} \geq \frac{(b''_{n-1} + 0.5p)z_n - (b'_n + 0.5p)z_{n-1}}{z_n - z_{n-1}}, \quad (4)$$

где  $b'$  и  $b''$  – линейное перемещение вдоль оси X ( $NN'_x = b'$ ,  $NN''_x = b''$ ).

Таким образом, при найденных значениях координат БП X и Y (2) и (4), наложения изображений МР в поле анализа БП происходить не будет.

Для обеспечения требуемой точности проведения измерений, значение облученности МПОИ должно превосходить значение пороговой облученности в 800-1000 раз [8]. Тогда, приняв требуемое отношение сигнал/шум  $\mu$ , при котором значение погрешности измерения любого параметра не превышает допустимого, диаметр входного зрачка объектива  $D_{БП}$  вычисляется по следующей формуле:

$$D_{БП} = d \sin\left(\frac{\theta_{1/2}}{2}\right) f' \sqrt{\frac{\mu E_{нор} \pi}{\tau P}}, \quad (5)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние объектива,  $d$  – диаметр излучающей поверхности ПИД,  $\theta_{1/2}$  – угол излучения ПИД,  $E_{нор}$  – пороговая облученность МПОИ,  $\tau$  – коэффициент пропускания оптической системы и воздушного тракта,  $P$  – мощность излучения ПИД.

По предложенной формуле (5) для прогибомера с характеристиками матрицы ON Semiconductor NOIV2SN1300A при следующих параметрах  $E_{нор} = 4.58 \cdot 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau = 0.08$  были получены графики зависимости требуемых значений размеров входного зрачка приемного блока  $D_{БП}$  (рис. 3) от мощности  $P$  источника излучения при различных фокусных расстояниях объектива.

Поскольку в предлагаемой схеме БП выбран объектив марки «Юпитер 11» ( $f' = 135$  мм), а в качестве источников оптического излучения в МР предложены ПИД типа VISHAY TSAL5100 с мощностью излучения 35 мВт ( $d = 5$  мм,  $\theta_{1/2} = 10^\circ$ ), то для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум достаточно будет иметь  $D_{БП}$  не более десятка миллиметров.

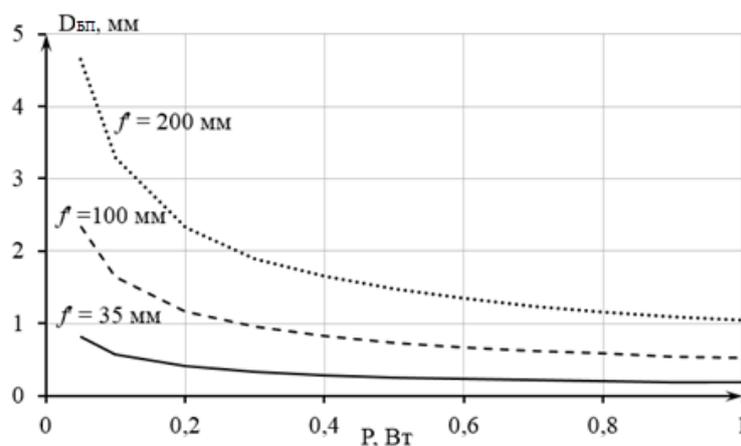


Рис. 3. Зависимость диаметра входного зрачка  $D_{БП}$  от мощности источника излучения  $P$  при разных фокусных расстояниях объектива

Полученные значения позволили выбрать параметры оптической схемы, которые нашли воплощение в конструкции БП (рис. 4), представляющий собой корпус

10 с крышкой 11, в котором размещаются и закрепляются необходимые сборочные единицы и детали.

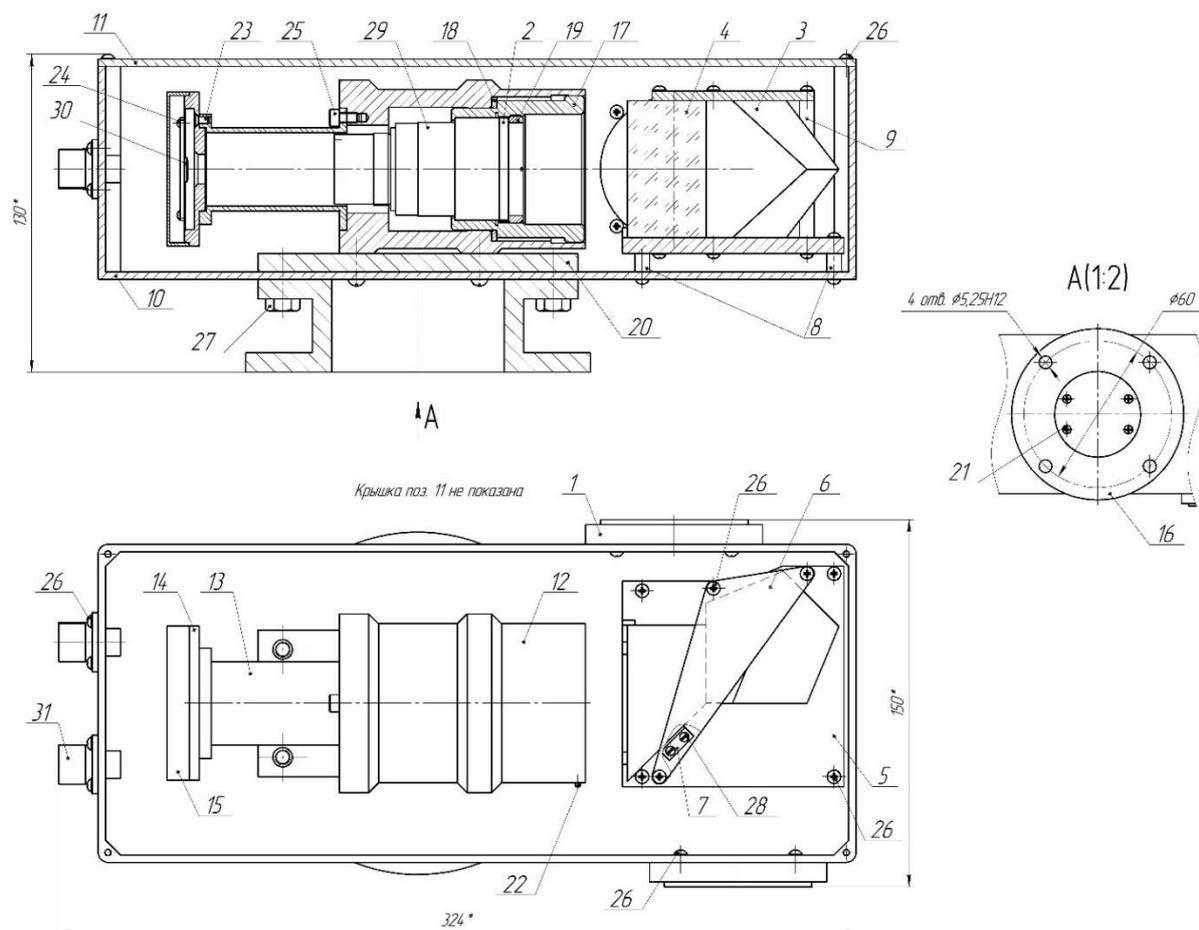


Рис. 4. Конструкция блока приемного

Пентапризма с крышей БкП-90 3 и призма АР-90 4 устанавливаются на основание с упорами 5 и фиксируются прижимной планкой 6 и угловой планкой 7. Призменный блок имеет возможность угловых поворотов с целью согласования базовых поверхностей корпуса БП с оптической базой системы.

Очевидно, что для МР, расположенных на разных дистанциях, изображения, рассматриваемые в одной и той же плоскости, будут расфокусированы. Анализ показал, что фокусировка объектива должна осуществляться на минимальный кружок рассеяния для метки, расположенной на максимальной дистанции, поскольку в этом случае обеспечивается максимальная позиционная чувствительность контроля положения изображения на МПОИ и, соответственно, максимальная точность контроля пространственного положения МР и величины прогиба. В разработанной конструкции объектив «Юпитер 11» 29 фокусируется на дистанцию размещения дальних МР путем подрезки кольца 18.

### Заключение

Предложено применить в прогибомере оптическую систему отклонения лучей СОЛ, состоящую из пентапризмы с крышей БкП-90 и призмы АР-90, и единое фотоприемное матричное поле анализа для контроля положения нескольких МР, что позволит ослабить вредное влияние разворотов БП при определении величины прогиба.

Приведены выражения условий непересечения полей оптической системы в БП

при контроле нескольких изображений МР.

Сформировано выражение для габаритно-энергетического расчета оптической системы, на основании которой выбраны параметры оптической системы и разработана конструкция БП.

Физическая реализация прогибомера на основе разработанной конструкции позволит проводить дальнейшие исследования возможных погрешностей в реальных условиях эксплуатации.

### Литература

1. Прогибомер оптико-электронный доковый [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://oeps.ifmo.ru/lab/shipyard> (дата обращения: 24.02.2020).
2. Алеев А.М., Горбачев А.А., Коротаев В.В. Исследование схем построения базового блока оптико-электронного прогибомера // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 9–11.
3. Горбачев А.А., Коняхин И.А., Мусяков В.Л., Тимофеев А.Н. Исследование особенностей построения инвариантных оптико-электронных систем с единым матричным полем анализа // Оптический журнал. 2007. Т. 72. № 12. С. 24–29.
4. Korotaev V.V., Pantiushin A.V., Serikova M.G., Anisimov A.G. Deflection measuring system for floating dry docks // Ocean Engineering. 2016. V. 117. P. 39–44.
5. А.с. 346573 СССР, МКИ G 01 B 11/16. Оптический прогибомер / СЮ. Сурodeйкин, З.А. Скворцова (СССР). 1453582/25-28; заявл. 06.07.70; опубл. 28.07.72. Бюл. № 23.
6. Хоанг А.Ф., Горбачёв А.А., Коняхин И.А., Тонг М.Х. Анализ погрешности определения параметров поворота базового блока прогибомера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 818–824.
7. Hoang A.P., Gorbachev A.A., Konyakhin I.A. Image displacement analysis for electro-optical system for deflection measurement of floating docks // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 11053. pp. 110534A.
8. Андреев А.Л., Коротаев В.В. Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. №10. С. 69–75.

**Клепова Анна Николаевна**

Год рождения: 1979

Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,

направление подготовки: 02.00.04 – Физическая химия,

e-mail: compasserika@gmail.com

УДК 621.78.019

## **ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГООБЛОКОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

**А.Н. Клепова**

**Научный руководитель – д.х.н., доцент А.А. Слободов<sup>1</sup>**

**1 – Университет ИТМО**

### **Аннотация**

Изучены физико-химические процессы в водном теплоносителе первого контура АЭС с ВВЭР и связанные с температурой и концентрацией вводимых соединений вопросы рН среды. Это позволяет установить связь между ними, а также превращение соединений при изменении условий (температуры, ввода борной кислоты, едкого калия и аммиака).

### **Ключевые слова**

Физико-химическое моделирование, оптимизация ВХР, борнокалиевый режим, ВВЭР, рН теплоносителя, коррозия.

### **Вводная часть**

Изучение закономерностей химических взаимодействий внутри теплоносителя первого контура АЭС является достаточно сложной задачей. Первый контур установки предназначен для отвода тепла, выделяющегося в реакторе, и передачи его во второй контур в парогенератор. В состав входят: реактор, парогенератор, главный циркуляционный насос (ГЦН), система компенсации давления, система подпитки и очистки контура, система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), газовые сдувки, организованные протечки и дренаж спецводоочистки [1].

Так как стандартным поглотителем нейтронов является борная кислота, то для контроля водно-химического режима - ВХР на отечественных АЭС применяется борнокалиевый режим работы. На рис. 1 представлен график зависимости молярной концентрации щелочных металлов в теплоносителе первого контура [2].

Описание механизма физико-химических взаимодействий в первом контуре является сложной задачей. С точки зрения термодинамики теплоноситель является многокомпонентной системой. В связи с этим предложена термодинамическая модель, описывающая поведение системы при различных нормативных параметрах ВХР, что позволяет прогнозировать происходящие изменения в составе теплоносителя на широком диапазоне температур, от рабочей до температуры останова.

### **Методика термодинамического описания**

Многокомпонентная система при постоянных параметрах состояния, в нашем случае это давление и температура, стремится прийти в более устойчивое состояние, которое характеризуется минимумом свободной энергии системы. Исходные условия равновесия системы следующие:

$$G = \sum \mu_i y_j \equiv \sum_{i=1} (\mu_i^0 + RT \ln \gamma_i x_i) y_i \rightarrow \min_{[y_i]} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} y_i = y_j^0, j \in 1:m, y_i \geq 0 \quad (2)$$

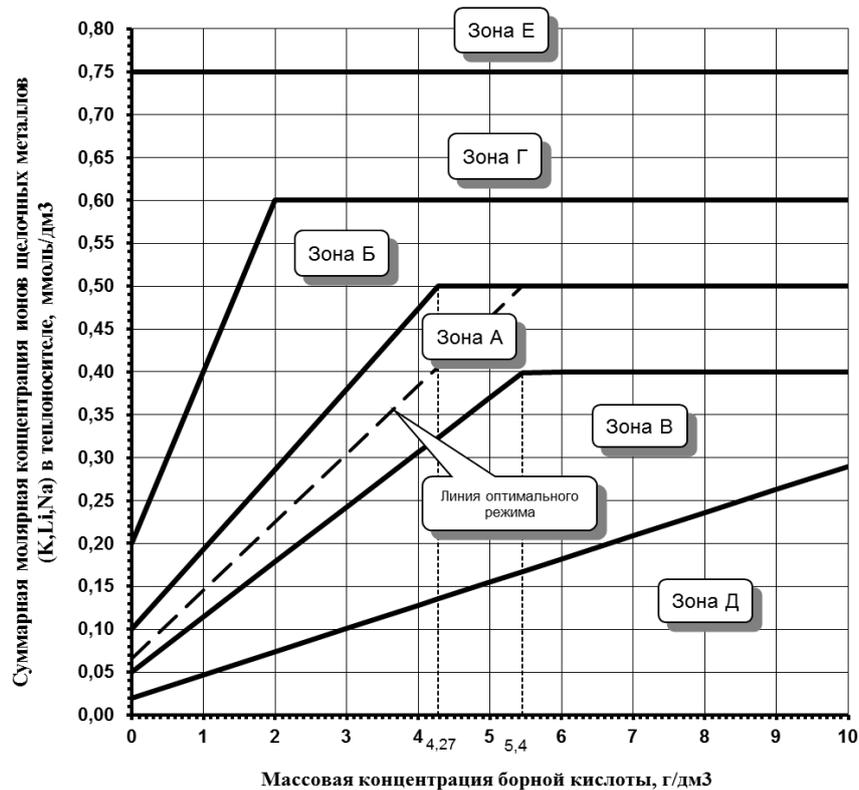


Рис. 1 Зависимость суммарной молярной концентрации щелочных металлов (К, Li, Na) в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты

Зона А соответствует диапазону нормируемых значений зоны Б и В соответствуют первому уровню отклонений. Продолжительность работы блока АС в РМ в пределах зон Г и Д не должна превышать 24 часа. При достижении одним или несколькими нормируемыми показателями значений зоны Е, блок АС должен быть переведен в ХС.

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} y_i = y_j^0, j \in 1:m, y_i \geq 0 \quad (3)$$

где  $y_i^0, j \in 1:m$  – заданные условия материального баланса,  $\{a_{ij}\}_{n \times m}$  – стехиометрическая матрица системы, выражающая все компоненты системы через базис;  $y_i, \mu_j, \mu_i^0 (i \in 1:m)$  – искомые количества (моль, гр., и др.) компонентов системы, их химические и стандартные химические потенциалы соответственно. Преобразованное условие равновесия представлено в виде нелинейного уравнения:

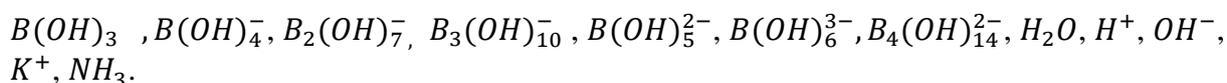
$$\mu_i^{(k)} = \sum_{i=1}^m a_{ij} \mu_i, \quad (i, k) \in I^0: y_i^{(k)} \geq 0 \quad (4)$$

Для термодинамического моделирования выбран банк данных ASTIB, который является пополняемым и на данный момент. Для компонентов водных растворов в банке данных содержатся термодинамические данные свыше 1500 веществ [3].

### Полученные результаты

Было выполнено, в соответствии с описанными методами, термодинамическое моделирование и расчет химического состава растворов и растворимостей в борнокалиевой системе:  $H_2O - H_3BO_3 - KOH - (H_2) - NH_3$ .

В результате происходящих процессов диссоциации – ассоциации, гидролиза химический состав воды первого контура реактора ВВЭР будет включать следующие соединения:



Приведем результаты моделирования влияния температуры на химическое взаимодействие при скоординированном содержании борной кислоты и гидроксида калия на основе разработанных методов. Из рис. 2 видно, что при  $T = 298.15$  К продиссоциировало около четвертой части борной кислоты, что привело к образованию протона водорода и продуктов моноядерного и полиядерного гидролиза в следующих концентрациях  $[B(OH)_4^-] = 10^{-4} m$ ;  $[B_2(OH)_7^-] = 10^{-7} m$ .

С повышением температуры концентрация данных продуктов будет уменьшаться, а борная кислота в нейтральной форме диссоциировать практически не будет. Аммиак при начальной температуре растворился более чем на 80%. Также видно, что при высоких температурах незначительно увеличивается концентрация азота. Гидроксид калия полностью диссоциировал. Как видно из графика, концентрация иона калия на всем диапазоне температур не меняется и примерно составляет  $[K^+] \sim 10^{-4} m$ .

Рассмотрим кислотно-щелочные свойства среды. При начальной температуре  $T = 25^\circ C$   $pH \sim 9$ , т. е. среда слабощелочная, при этом  $[OH^-] = 7 \cdot 10^{-6}$ ,  $[H^+] = 1.5 \cdot 10^{-9} m$ .

Рассмотрим борнокалиевую систему при  $T = 598.15$  К (рис.3). При рабочей температуре водного носителя первой степени диссоциации борной кислоты намного меньше, чем при тех же вводимых концентрациях, но при низкой температуре. Вклад гидроксокомплекса  $B(OH)_4^-$  значительно меньше, чем при  $T = 298.15$  К, правда, с ростом концентрации вводимой кислоты увеличивается на два порядка. Гидроксид калия заметно диссоциирует, концентрация ионов калия примерно равна вводимой в состав среды щелочи.

При высоких температурах аммиак практически не диссоциирует, что мы и видим по представленному графику, следовательно наблюдается небольшое содержание катионов аммония порядка  $10^{-5} - 10^{-6} m$ . Кислотно-основные свойства среды заметно отличаются от pH показателя при низких температурах. На всем диапазоне изменения концентрации борной кислоты среда проявляет основные свойства, немного уменьшается содержание гидроксид-ионов, так как от значения концентрации борной кислоты, равной  $0.077 m$ , вводимая концентрация щелочи не меняется.

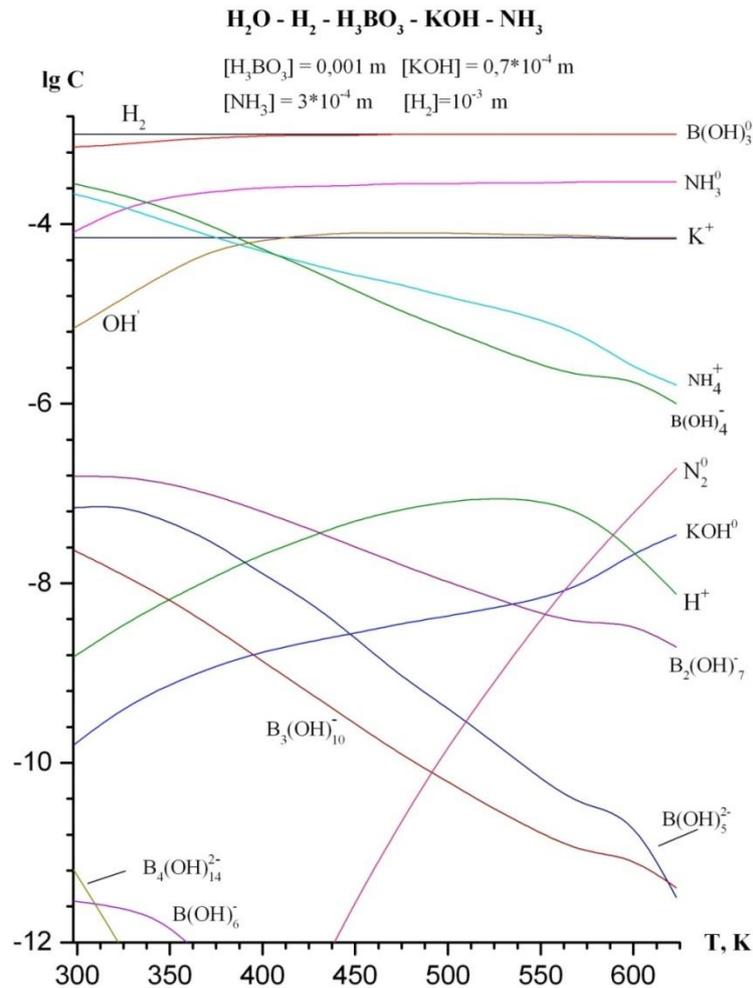


Рис. 2. Влияние температуры на химическое взаимодействие при скоординированном содержании борной кислоты и гидроксида калия при [H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>] = 0.001 m и [KOH] = 0.7·10<sup>-4</sup>m

борной кислоты среда проявляет основные свойства, немного уменьшается содержание гидроксид-ионов, так как от значения концентрации борной кислоты, равной 0.077 m, вводимая концентрация щелочи не меняется.

### Обсуждение результатов

В результате исследования получено, что крайне нежелательно падение температуры в первом контуре, особенно при увеличении концентрациях борной кислоты, так как среда становится кислой, отсюда вытекает прямая зависимость увеличения скорости коррозии на конструкционных материалах контура. Эти факты актуально учитывать, когда ядерный реактор находится в режиме расхолаживания, естественно, смоделированные данные позволяют прогнозировать и состояние системы во временном интервале. При повышении концентрации борной кислоты и температуре около 300 K увеличивается процент ее содержания в полиборатной форме. Это показатель того, что независимо от pH среды содержание кислоты достаточно велико. По степени концентрации присутствующей кислоты можно делать выводы о необходимости корректировки ВХР, т. е. если кислоты много, значит надо продумать модель поведения в зависимости от необходимости нейтрализации радиоактивности водного контура. На данный момент есть технические средства, позволяющие измерять pH среды в рабочем режиме. Пользуясь разработанной методологией, можно вывести на основании pH среды ее физико-химический состав (рис. 3).

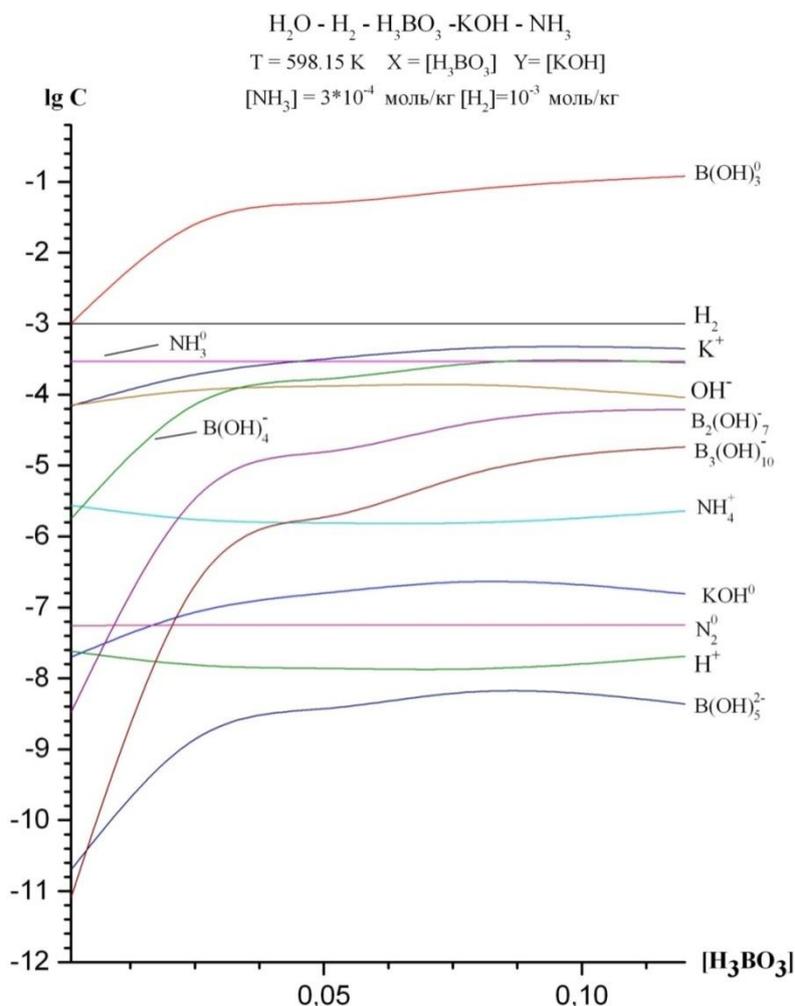


Рис. 3. Влияние содержания борной кислоты и гидроксида калия на химические взаимодействия при высоких температурах – условиях эксплуатации

По щелочи гидроксида калия можно сделать следующие выводы: она активно диссоциирует, практически полностью, на всем интервале температур. Концентрация калия не влияет на процесс коррозии. Исследуя диссоциацию вводимого аммиака, приходим к выводу, что степень распада на ионы напрямую зависит от температуры, что подтверждается химическими особенностями данного соединения.

### Литература

1. Колпаков Г.Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2009.
2. Рошкетаяев Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ. 2010.
3. Слободов А.А. Термодинамическое моделирование физико-химического состава многокомпонентных систем в широкой области параметров состояния // Автореферат дисс. на соиск. уч. степени доктора хим. наук, спец. 02.00.04. СПб ГТИ // С.-Пб. 2002. 40 с.



**Ласкавый Николай Сергеевич**

Год рождения: 1998  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы №В5408,  
направление подготовки: 12.05.65.01 – Оптико-электронные  
информационно-измерительные приборы и системы  
специального назначения,  
e-mail: lns1998@inbox.ru



**Васильев Александр Сергеевич**

Год рождения: 1988  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., доцент,  
e-mail: a\_s\_vasilev@itmo.ru

УДК: 621.376.2

**РАЗРАБОТКА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕДАТЧИКА  
НА ОСНОВЕ МОДУЛЯТОРА МЗМ-Х-014**

**Н.С. Ласкавый**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент А.С. Васильев**

**Аннотация**

Работа посвящена разработке оптико-электронного передатчика, на базе интегрального электрооптического модулятора МЗМ-х-014. Описаны следующие этапы разработки: постановка целей, анализ существующих аналогов, формирование структуры разрабатываемого устройства, выбор компонентов и сборка макета. Выбор темы обоснован дефицитом оптико-электронных трактов отечественной разработки и увеличивающимся спросом на них в следующих сферах деятельности: телекоммуникация, внутрибортовая связь, системы ретрансляции сигнала.

**Ключевые слова**

Сверхвысокочастотный передатчик, внешняя модуляция сигнала, электрооптический модулятор на подложке из ниобата лития, оптико-электронный тракт, преобразование сигнала.

Применение микроволновой фотоники в телекоммуникации, системах радиосвязи, радиолокации и радиоэлектронной борьбе в последние несколько десятков лет получило широкое распространение вследствие того, что по сравнению с традиционными линиями передачи СВЧ-сигнала (коаксиальными кабелями) волоконно-оптические линии имеют уменьшенные габариты и массу, малые потери, расширенную рабочую полосу частот, нечувствительность к электромагнитным наводкам, лучшую фазовую стабильность и возможность когерентного приема и обработки сигналов [1].

Предлагаемая разработка оптического сверхвысокочастотного преобразователя сигнала с внешней модуляцией на основе электрооптического модулятора

интенсивности света на ниобате лития МЗМ-х-014 направлена на телекоммуникационные компании и операторов связи, также данное устройство будет полезно предприятиям, целью которых является создание систем ретрансляции радиосигнала через различные препятствия (стены, защитные сооружения, экранированные помещения), передача радиосигнала с вышки на пункт обработки, внутрисетьевая связь, стелс-технологии.

Оптический СВЧ передатчик представляет собой устройство для преобразования входного СВЧ информационного сигнала в оптический, с последующим выводом последнего на выход из устройства. Компонентную базу радиофотоники и строящиеся на их основе функциональные элементы и устройства можно разделить на пять типов: оптико-электрические преобразователи, электрооптические преобразователи, датчики СВЧ-сигнала с оптическим управлением, преобразователи оптического сигнала и преобразователи СВЧ-сигнала [2].

В оптическом СВЧ передатчике не присутствуют все возможные типы функциональных элементов. Исходя из решаемых передатчиком задач, в него входят СВЧ-усилитель (СВЧУ), модулятор (М) и оптический источник излучения (ИОИ).

Помимо данных элементов необходимо присутствие некоторых вспомогательных компонентов, таких как контроллер рабочей точки, для регулирования рабочей точки модулятора и платы питания, для обеспечения всех остальных элементов питанием.

Структурная схема оптического СВЧ передатчика представлена на рис. 1.

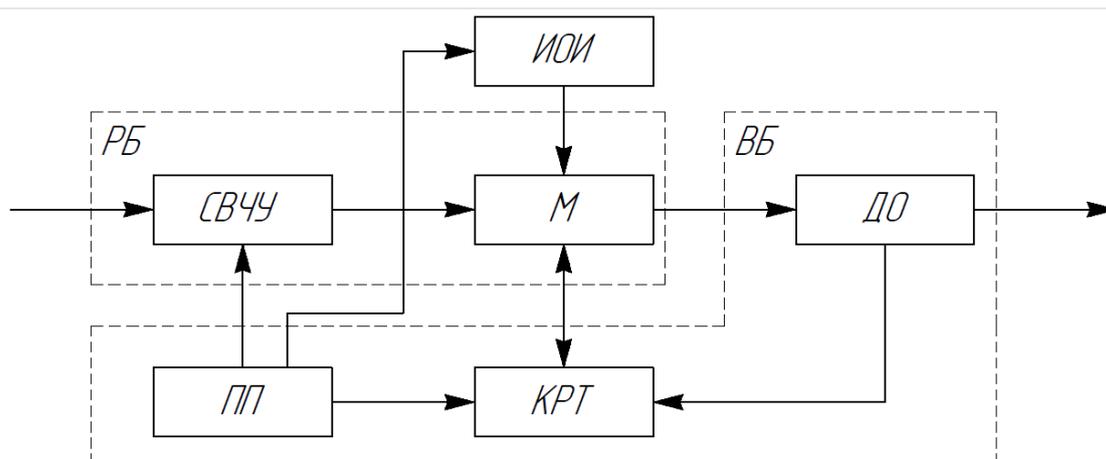


Рис. 1. Комбинированная структурная схема оптического СВЧ передатчика;  
ИОИ – источник оптического излучения; РБ – радиочастотный блок;  
СВЧУ – сверхвысокочастотный усилитель; М – модулятор; ВБ – вспомогательный блок;  
ДО – делитель оптический; ПП – плата питания; КРТ – контроллер рабочей точки

Для удобства использования оптический СВЧ передатчик был поделен на два блока: Радиочастотный блок (РБ) и Вспомогательный блок (ВБ). В первый блок входят СВЧ-усилитель и модулятор, так как именно в этих блоках идет взаимодействие с СВЧ сигналом. Во второй блок входят оптический делитель, плата питания и КРТ.

На вход СВЧ-усилителя подается несущий полезную информацию СВЧ сигнал, а после усиления он поступает на модулятор. Туда же поступает несущий оптический сигнал с источника оптического излучения. Модулированный сигнал, вышедший из модулятора, делится на делителе оптическом (ДО), далее, основная часть сигнала (99%) идет на выход из устройства, а малая (1%) – на контроллер рабочей точки (КРТ). После обработки поступившего сигнала, в КРТ происходит обработка полученной информации и корректировка положения рабочей точки, если таковая необходима.

Плата питания (ПП) преобразует входное напряжение и обеспечивает подачу необходимых напряжений для каждого отдельного элемента (СВЧ-усилителя, источника оптического излучения и контроллера рабочей точки).

Был произведен обзор аналогов разрабатываемого устройства, ближайшими, наиболее похожими оказались радиофотонные передатчики MP-6000TX от компании Microwave Photonic Systems (США) и EMCORE SITU3018/311 от компании EMCORE (США). В таблице приведено сравнение основных технических параметров зарубежных аналогов [3, 4] и целевых параметров разрабатываемого устройства.

Анализируя данные, представленные в таблице можно прийти к выводу, что разрабатываемое устройство как минимум не уступает по своим параметра зарубежным аналогам, а по некоторым показателям, таким как Рабочий диапазон частот, Неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне частот и масса даже превосходит их.

Таблица

**Сравнение параметров рассматриваемых передатчиков**

Наименование параметра	MP-6000TX	EMCORE SITU3018/311	Разрабатываемое устройство
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,5 – 20	0,01 – 18	0,01 – 20
Рабочая длина волны, нм	1310 или 1550 <b><math>\pm 5,0</math></b>	1550	<b><math>1550 \pm 20</math></b>
Мощность выходного оптического сигнала, дБм	5	9/12	10
Неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне частот, дБ	$\pm 1$ на каждые 500 МГц	–	3
Уровень собственных шумов по оптическому выходу, дБм	48	37/40	40
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	127×76,2×25,4	91,4×233,7×33	300×170×80
Масса, г	–	822,14	500

Для корректной работы модулятора СВЧ-сигнал на его входе необходимо предварительно усилить с помощью подходящего СВЧ-усилителя. Первым и основным критерием подбора выступает рабочая полоса пропускания (от 0,01 до 20 ГГц), вторым - выходное напряжение (не меньше, чем рабочая у модулятора (7 В)), также немаловажен коэффициент шума. Всем критериям соответствует широкополосный СВЧ-усилитель DR-AN-20-MO (<https://sphotronics.ru/upload/iblock/1bb/1bbddf9667ed72ed3c58eb6a2df02b05.pdf>).

В процессе подбора источника оптического излучения, прежде всего, необходимо обратить внимание на диапазон длин волн, в котором излучает источник. В целевых технических характеристиках указано, что выбранный ИОИ должен излучать на длине волны  $1550 \pm 20$  нм. В ходе анализа выбор остановился на модуле контроллера лазерного диода DX1 из-за наилучшего соотношения цены к техническим характеристикам [5].

Финалом разработки сверхвысокочастотного передатчика является сборка лабораторного макета и его тестирование. Был проведен ряд экспериментов по измерению амплитудно-частотной характеристики собранного устройства, по методике, которая основывается на подаче высокочастотного сигнала постоянной

мощности с частотой от 4 до 20 ГГц на вход усилителя и измерение мощности дополнительных гармоник оптического сигнала (несущих информацию) на выходе сверхвысокочастотного модулятора. Амплитудно-частотная характеристика измерялась с помощью оптического спектрального анализатора AQ6319 (<https://cdn.tmi.yokogawa.com/AS-62642-01Y.pdf>). С помощью программного обеспечения высчитывалась мощность сигнала  $P$  на дополнительных гармониках оптического сигнала. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

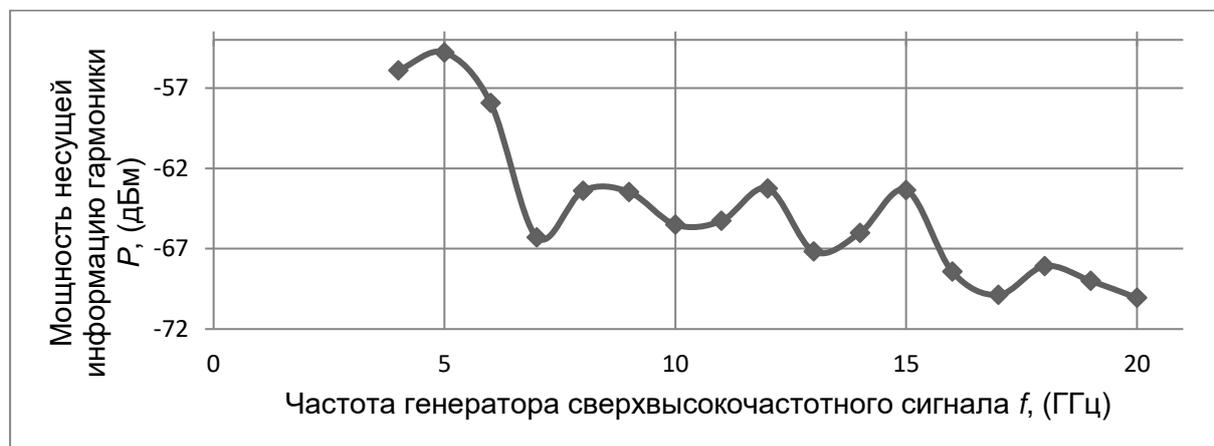


Рис. 2. График зависимости мощности несущей сигнал гармоники от частоты генерации

Анализируя данные, полученные при тестировании макета устройства, можно прийти к выводу, что удовлетворительные показатели мощности несущей информацию гармоники наблюдаются только на генерации с частотой близкой к 5 ГГц, при увеличении частоты до 20 ГГц сигнал становится неотличимым от шума. Данные выводы показывают несовершенство лабораторного макета, следовательно, рассматриваемая разработка нуждается в доработке и дальнейшем тестировании усовершенствованных макетов.

## Литература

1. Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вильямс Кейт Дж. Основы микроволновой фотоники // Москва: ТЕХНОСФЕРА. 2016. 376 с.
2. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии // Российский технологический журнал. 2016. №4(1). С. 4–20.
3. Datasheet MP-6000TX Microwave Photonic Systems [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://oessp.ru/upload/iblock/e49/e493d169992f84428895b4a456441376.pdf> (дата обращения: 23.03.2020).
4. Datasheet, SITU3018/3118 0.01-18 GHz Externally-Modulated Unamplified Transmitter EMCORE 07.2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sphotronics.ru/upload/iblock/59d/59d8715e86e7d3377c4361c15867a72d.pdf> (дата обращения: 23.03.2020).
5. Datasheet, DX1 Laser Diode Controller Module Eblana Photonics 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cybel-llc.com/wp-content/uploads/2016/01/DX-1-Manual-3.pdf> (дата обращения: 23.03.2020).



**Родикова Лилиана Сергеевна**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
магистрант группы №В41013с,  
направление подготовки: 12.04.02 Опотехника,  
e-mail: liliana.baranowa@yandex.ru



**Коротаев Валерий Викторович**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,  
e-mail: vvkorotaev@itmo.ru



**Тимофеев Александр Николаевич**  
Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
к.т.н., с.н.с.,  
e-mail: timofeev@itmo.ru

УДК 681.786

**О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВИДЕОЭНДОСКОПИРОВАНИЯ  
ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА РАБОЧИХ ЛОПАТОК СТУПЕНЕЙ  
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

**Л.С. Родикова, В.В. Коротаев, А.Н. Тимофеев**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Коротаев**

Работа выполнена в рамках темы НИР №619297 «Разработка методов и средств решения прикладных задач фотоники».

**Аннотация**

В процессе эксплуатации паровых турбин лопатки их цилиндров низкого давления повреждаются вследствие каплеударных нагрузок и протекающих эрозийных процессов износа. При повреждении лопаточного аппарата ухудшается производительность и ограничивается ресурс паровых турбин, а в некоторых случаях, если не диагностировать повреждения на ранних стадиях, приводят к тяжелым аварийным разрушениям оборудования. Поэтому задача надежного контроля состояния лопаток имеет важное значение.

## Ключевые слова

Паровые турбины, лопатки, эндоскоп, бесконтактный контроль, эрозийный износ, деформации.

Основной задачей диагностики лопаток цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин является обеспечение их безаварийной работы. Контролируемыми параметрами в этом случае являются габаритные характеристики лопаток последних ступеней, хорда профиля или участка, наличие трещин. Основными методами контроля износа лопаток являются [1]: эндоскопический контроль, дискретно-фазовый метод, метод радиоактивного контроля, измерение геометрических параметров стандартным измерительным инструментом, фото-видеосъемка (фоторегистрация), метод слепков и оттисков.

Технические эндоскопы широко используются во многих областях промышленности. Они позволяют выявить такие опасные дефекты как трещины, V-образные зазубрины и выколки, обнаруженные вдоль передней кромки лопатки турбины [2]. Эндоскопы широко применяются для осмотров авиационных двигателей, газотурбинных двигателей и ракетных систем [3]. Основным достоинством данного метода является то, что эндоскопы позволяют проводить контроль деформаций неконтактным способом и контролировать элементы в труднодоступных местах.

Технические эндоскопы можно классифицировать по разным критериям. В зависимости от того, что включает в себя конструкция устройства, камеру или другое приемное устройство эндоскопы можно разделить на два типа это визуальный и видеоэндоскоп. В зависимости от способа передачи оптического сигнала различают классическую оптическую эндоскопию, с использованием жестких (линзовых) бороскопов, эластичных (оптоволоконных) фиброскопов, а также цифровую эндоскопию, с использованием видеоэндоскопов. Наглядно данная классификация представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация технических эндоскопов по способу передачи сигнала и изменения угла обзора

Рассмотрим устройство трёх основных типов технических эндоскопов: бороскоп, фиброскоп и видеоэндоскоп.

Бороскоп имеет жесткую и прямую неподвижную выносную часть (рис. 2) [4]. Предназначен для визуального контроля узлов, к которым возможен прямолинейный доступ. Чаще всего они используются для осмотра газоздушного тракта

авиадвигателей, полостей машин и механизмов, пустот в стенах зданий, каналов и труб малого диаметра.

Бороскопы состоят из визуальной и осветительной системы. Первая служит для непосредственного наблюдения и исследования, вторая обеспечивает подачу света на обследуемый объект или поверхность. Эти две системы заключены в жесткую внешнюю трубку.

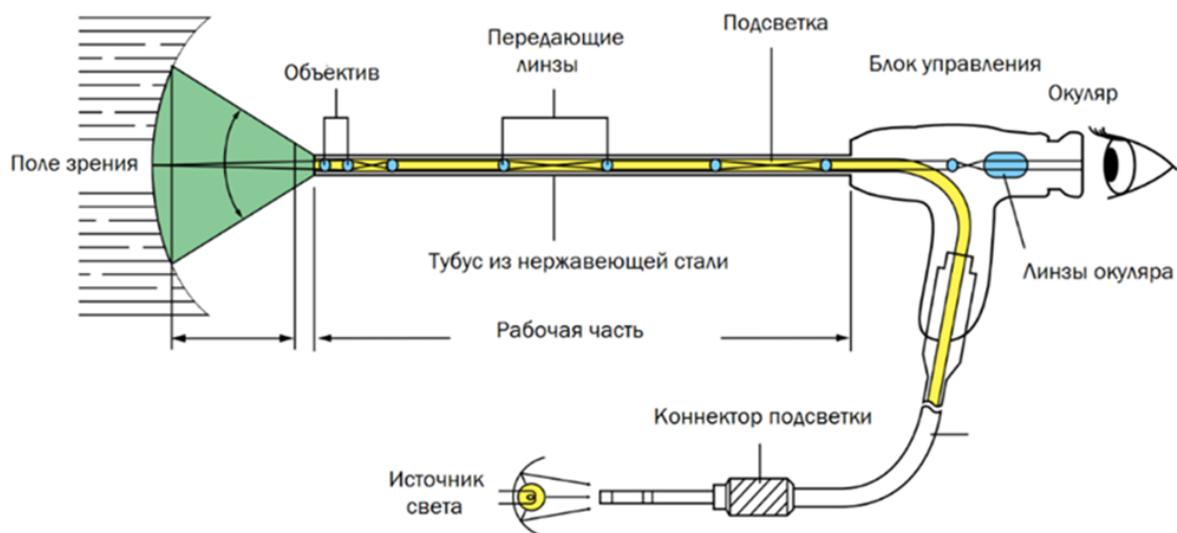


Рис. 2. Схема устройства жёсткого визуального эндоскопа

В фиброскопах для передачи изображения используется гибкий жгут, который состоит из тонких оптических волокон, уложенных в пучок (рис. 3). Концы жгута собираются в единую конструкцию (проклеиваются или спекаются). Такой жгут можно сгибать, скручивать, смещать без ущерба для оптических и механических свойств волокон. Защищает жгут от повреждений гибкая металлическая или пластмассовая оболочка с управляемым дистальным концом [5]. Она одновременно ограничивает радиус изгиба.

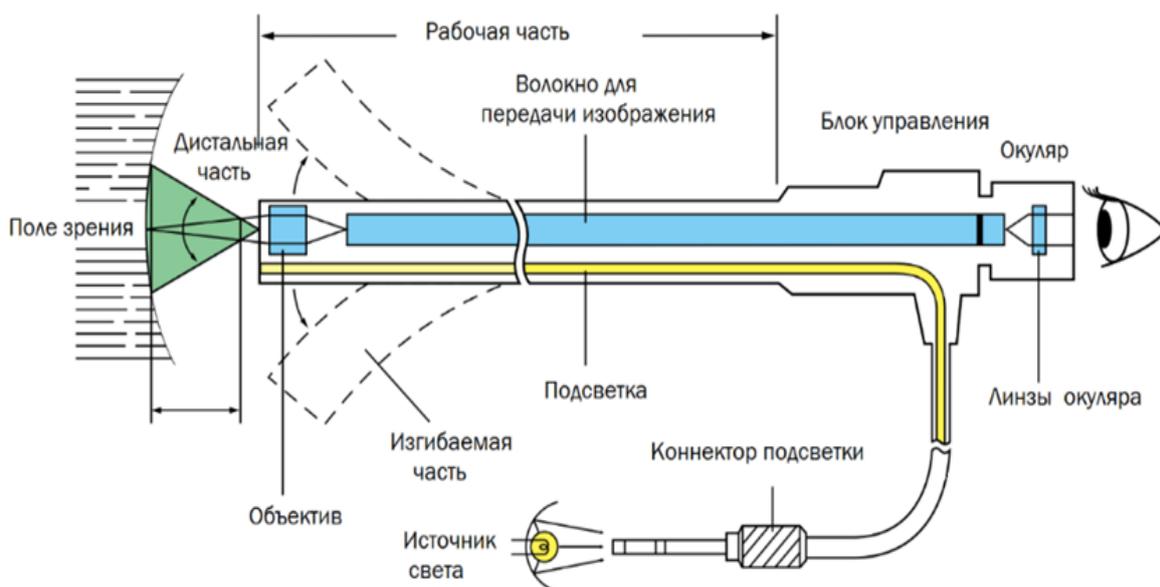


Рис. 3. Схема устройства гибкого визуального эндоскопа

Принципиальное отличие видеоэндоскопов в том, что этот тип приборов оснащен видеокамерой. При помощи гибкого наконечника производится обследование нужного объекта, а получаемое изображение передается на экран видеомонитора. При этом запись процесса исследования может записываться на внешний видеоноситель или жесткий диск.

Замена в системе передачи изображения волоконно-оптического жгута на кабель передачи сигнала позволила повысить разрешающую способность приборов и увеличить длину рабочей части (рис. 4).

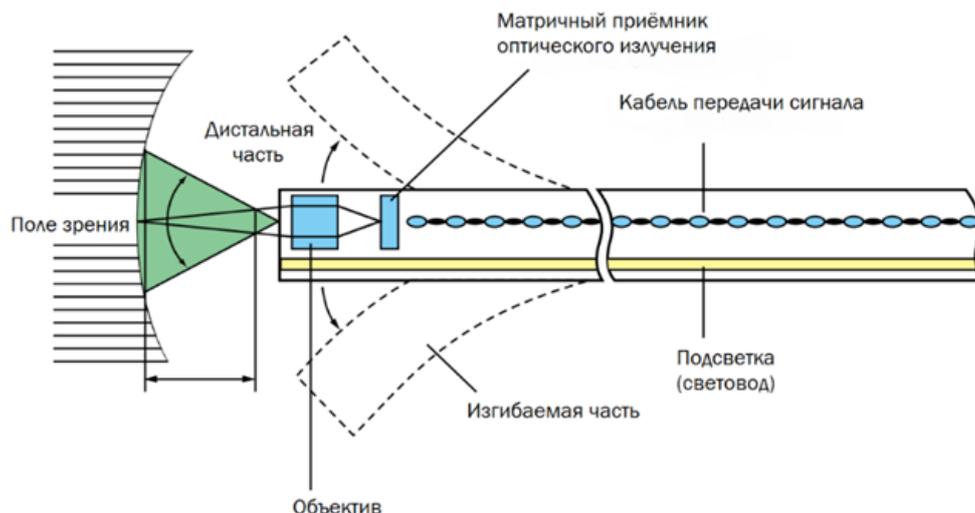


Рис. 4. Схема устройства видеоэндоскопа

Каждый из перечисленных типов эндоскопов имеет свои достоинства и недостатки.

Наиболее показательными характеристиками для сравнения систем эндоскопии являются: разрешающая способность, допустимые условия эксплуатации, возможность измерения в труднодоступных местах, длина рабочей части и возможность записи изображений на внешний носитель. Для наглядности оценки каждого типа эндоскопов по этим показателям представлены на рис. 5.

Для того, чтобы предотвратить поломку турбины, своевременно обнаружить и заменить повреждённые элементы необходимо проводить периодический осмотр всех лопаток. Такой осмотр осуществляется при останове турбины, при этом турбину разбирают для того, чтобы иметь доступ к каждой лопатке. Такой осмотр требует большого времени и экономически не выгоден.

Типы эндоскопов	Показатели				
	Разрешающая способность	Условия эксплуатации	Трудно-доступные места	Ограничение по длине	Наличие экрана, запись на внешний носитель
Бороскопы	+	+	-	-	-
Фиброскопы	-	+/-	+	+/-	-
Видео-эндоскопы	+/-	-	+	+	+

Рис. 5. Анализ трёх типов эндоскопов по разным показателям

Более эффективным является осмотр лопаточного аппарата турбины с помощью эндоскопов. Такой осмотр можно выполнить за достаточно небольшой промежуток времени и это можно сделать в режиме валоповорота. При введении эндоскопа в проточную часть турбины через специальные отверстия можно просматривать последовательно каждую лопатку при прокручивании турбины. Это позволяет проводить осмотр ЦНД без вскрытия его конструкции.

При валоповороте осуществлять визуальный анализ не представляется возможным, поэтому необходимо автоматизировать систему контроля и анализа состояния лопаток. Простые эндоскопы для таких целей не подходят. Необходимо устройство способное захватывать изображение лопатки, проводить его обработку и анализ деформаций.

В настоящее время имеется большое разнообразие эндоскопических систем. Это связано с тем, что для выполнения конкретных задач зачастую требуется разработать специальные системы эндоскопирования. Системы измерения эрозийного износа рабочих лопаток турбины содержат источник света, эндоскоп и регистратор информации.

При автоматизированном контроле возникает проблема определения номера контролируемой лопатки. Определение номера контролируемой лопатки можно осуществить, включив в конструкцию синхродатчик.

Таким образом, необходимо создать интеллектуальную систему эндоскопирования на основе гибкого или жёсткого эндоскопов в связке с камерой или видеоэндоскопа, которая бы смогла сама принимать решение о состоянии лопаток и давать оператору уже готовую информацию. Такая система должна включать синхродатчик, для определения номера анализируемой лопатки.

В качестве прототипа для разрабатываемой системы выбрано «Устройство для измерения эрозийного износа рабочих лопаток паровых турбин» [6]. Данное устройство (рис. 6) представляет собой аппаратно-программный комплекс в портативном исполнении, устанавливаемый на ЦНД непосредственно перед измерениями. Устройство обеспечивает возможность одновременного автоматического измерения эрозийного износа входных кромок и уменьшающейся в результате износа хорды лопаток. Результаты текущего измерения сравниваются с результатами измерения, полученными при предыдущем осмотре.

Устройство содержит эндоскоп 1, на приемной части которого размещены объектив 2 и импульсные источники излучения 3 и 4. На выходной части эндоскопа 1 установлен регистратор 5. Если отсчетная база реализуется в виде световой полосы или теневой полосы, зона освещенности должна быть больше поля зрения. После экспозиции управляющий сигнал с выхода электронной схемы поступает на регистратор 5 и подготавливает его к следующей лопатке. К эндоскопу 1 с помощью кронштейна 6 прикреплен штанга 7 с приемником излучения 8. При включенном электродвигателе валоповоротного устройства турбины рабочие лопатки перемещаются относительно объектива 2 и импульсного источника 3.

Источник излучения 4 и оптически согласованный с ним приемник излучения 8 образуют датчик синхронизации. Во время пересечения светового луча датчика синхронизации рабочей лопаткой сигнал на входе приёмника 8 отсутствует, а при совпадении выходной кромки лопатки с оптической осью датчика на входе приёмника появляется напряжение. Это позволяет нам определить время включения вспышки для съёмки кадра и определить номер проходящей лопатки. В момент, когда лопатка занимает относительно эндоскопа положение наилучшего видения, истекает время задержки синхронизирующего, включается импульсный источник 3. Его вспышка формирует на поверхности лопатки освещенную зону с четко очерченными границами

в поле зрения объектива 2. Эти границы являются отсчетной базой для определения количественных характеристик эрозионного износа входной кромки (рис. 6).

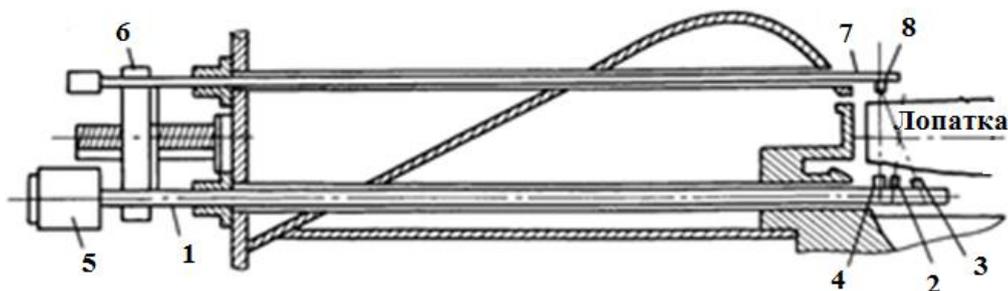


Рис. 6. Схема «Устройства для измерения эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин»

Обзор показал, что перспективным методом бесконтактного контроля эрозионного износа лопаток паровых турбин является эндоскопирование. Имеющиеся на рынке эндоскопы разных типов имеют свои особенности и недостатки, однако, они не могут применяться для полного автоматического контроля закрытого ЦНД турбины. Из этого сделан вывод о необходимости разработки специальной системы эндоскопирования, которая позволила бы получать оператору готовую информацию о состоянии каждой лопатки без вскрытия турбины. Наиболее подходящим прототипом для разрабатываемой системы является «Устройство для измерения эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин».

Предполагается, что эндоскоп через специально выполненное отверстие вставляется в закрытый ЦНД, после чего в режиме валоповорота осматриваются все лопатки. Система захватывает изображение каждой из лопаток, эти кадры передаются в блок обработки изображения, где с помощью специально разработанного программного обеспечения происходит анализ состояния лопаток. Синхродатчик, с помощью специальной метки, установленной на валу, позволяет определять номер просматриваемой лопатки.

Таким образом, оператор получает информацию о состоянии каждой лопатки и принимает решение о возможности продолжения эксплуатации турбины или о необходимости ее разборки и замены деформированных лопаток.

## Литература

1. Явельский М.Б., Котенев А.А. Контроль за процессами износа лопаток турбин с помощью оттисков. // Электрические станции, 1969. №7. С. 82-83.
2. Zbigniew Korczewski Endoscopic diagnostics of marine engines // Diagnostyka. 2007. №7. P. 19–25.
3. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. М.: Машиностроение. 2003. 830 с.
4. OLYMPUS Remote Visual Inspections [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.olympus.com.ru/company/ru/.html> свободный (Дата обращения 02.10.2019).
5. Сирота Г.А. Технические эндоскопы – приборы для визуального контроля труднодоступных объектов // В Мире НК. 2000. №2. С. 3–5.
6. Пат. 2020411 Российская Федерация, МПК G01B21/20. Устройство для измерения эрозионного износа рабочих лопаток паровой турбины/ Хаимов В. А., заявл. 18.08.1992, опубл. 30.09.1994.

**Снетков Петр Петрович**

Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,

направление подготовки: 18.06.01 – Химические технологии,

e-mail: ppsnetkov@itmo.ru

**Захарова Ксения Сергеевна**

Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
студент группы № В3466,

направление подготовки: 19.03.01 – Биотехнология,

e-mail: zakharova\_kseniia@lenta.ru

**Тянутова Мария Ивановна**

Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
аспирант,

направление подготовки: 04.06.01 – Химические науки,

e-mail: tyanutova95@gmail.com

**Иванов Андрей Юрьевич**

Университет ИТМО,  
факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент,

e-mail: ivaanur72@mail.ru

**Успенская Майя Валерьевна**

Университет ИТМО,  
факультет прикладной оптики,  
д.т.н., профессор,

e-mail: mv\_ustpenskaya@mail.ru

УДК 547.995.15:532.135

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ  
РАСТВОРОВ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ**

**П.П. Снетков, К.С. Захарова, М.И. Тянутова, А.Ю. Иванов**  
**Научный руководитель – д.т.н., профессор М.В. Успенская**

Работа выполнена в рамках научного проекта №19-33-90098 «Исследование свойств волокнистых материалов, полученных из водных и водно-органических растворов биополимеров».

**Аннотация**

Природные полимеры и материалы на их основе нашли широкое применение в медицине, тканевой инженерии и смежных областях благодаря их биосовместимости, биodeградируемости и нетоксичности. Наиболее перспективными являются плёнки и волокна, полученные из растворов биополимеров, в том числе с биологически-активными агентами. В данной статье рассмотрены реологические характеристики полимерных растворов, определяющие не только технологичность процесса их переработки, но и внутреннюю организацию полимерной цепочки в растворе.

### **Ключевые слова**

Биоматериал, гиалуроновая кислота, динамическая вязкость, прядильный раствор, реологические свойства.

### **Введение**

В настоящее время в медицинской практике и биоинженерии активно используются биосовместимые материалы, полученные из растворов гидрофильных биополимеров [1]. Наибольшее распространение получили полимерные плёнки [2] и волокна [3], в том числе наполненные фармакологическими субстанциями, например, антибиотиками [4]. При этом наиболее эффективными методами получения волокон является так называемый метод «мокрого» формования [5] и метод электрогидродинамического распыления жидкости (электроспиннинг) [6].

В связи с тем, что указанные выше методы предполагают использование тонких дозирующих фильер (игл), для обеспечения стабильности технологии изготовления полимерных волокон вне зависимости от используемого процесса необходимо знать физические параметры полимерных растворов: вязкость, плотность, поверхностное натяжение и электропроводность (для электроспиннинга).

При этом реологические параметры определяют не только возможность переработки полимерного раствора, но и могут свидетельствовать об изменениях организационной структуры самого полимера в растворе [7].

Наиболее удобным в получении реологическим показателем полимерных растворов является динамическая (абсолютная) вязкость. Этот показатель может быть получен как с использованием обычных капиллярных вискозиметров, так и с применением современных программируемых реометров в режиме изменяемой скорости сдвига. Кроме динамической вязкости может применяться величина кинематической вязкости как отношение динамической вязкости данного раствора к его плотности при этой же температуре.

Помимо этого, могут быть определены следующие реологические показатели:

- относительная вязкость (отношение динамической вязкости раствора к динамической вязкости растворителя);
- удельная вязкость (разность динамической вязкости раствора и растворителя, разделённая на динамическую вязкость растворителя);
- приведённая вязкость (удельная вязкость, разделённая на концентрацию раствора) как относительное приращение вязкости, отнесенное к единице концентрации [8];
- характеристическая вязкость (приведённая вязкость бесконечно разбавленного полимерного раствора).

С определением последней величины могут возникнуть сложности при использовании растворов полиэлектролитов, к которым относится гиалуроновая кислота, хитозан, гепарин, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и другие биополимеры. Такие полимеры характеризуются наличием полиэлектролитного набухания, то есть возрастанием приведённой вязкости при разбавлении полимерного раствора. Это вызвано увеличением объема линейных размеров макромолекулярного клубка полимера (набухание) из-за усиления электростатического отталкивания звеньев цепи с одноимёнными зарядами [9].

Кроме того, для подробного анализа структуры полимера в растворе и вязкоупругих свойств раствора используют осцилляционный режим измерения вязкости, при котором измерительная система совершает гармонические (синусоидальные) колебания с задаваемыми частотой и амплитудой [10]. С помощью такого режима можно получить следующие показатели:

– динамический модуль упругости при сдвиге  $G'$ , характеризующий накопленную энергию деформации в системе, отражает характеристики образца как твёрдого тела (упругая составляющая);

– модуль потерь  $G''$  определяет способность материала к рассеиванию энергии, и отвечает за поведение образца как жидкости (вязкая составляющая).

Измеренные значения модуля упругости и модуля сдвига позволяют получить и другие реологические характеристики в соответствии с таблицей [7, 11].

Таблица

#### Реологические характеристики при осцилляционном режиме измерения

Наименование	Обозначение	Способ вычисления
Комплексный модуль при сдвиге	$G^*$	$G^* = G' + i \cdot G''$
Коэффициент механических потерь	$\text{Tan}\delta$ (tan delta)	$\text{Tan}\delta = \frac{G''}{G'}$
Динамическая вязкость при сдвиге	$\eta'$	$\eta' = \frac{G''}{\omega}$
Мнимая часть комплексной вязкости при сдвиге	$\eta''$	$\eta'' = \frac{G'}{\omega}$
Комплексная вязкость при сдвиге	$\eta^*$	$\eta^* = \eta' + i \cdot \eta''$
Примечание: $\omega$ – угловая частота, рад·с <sup>-1</sup>		

Таким образом, знание реологических характеристик водных и водно-органических растворов позволит не только грамотно организовать технологический процесс получения полимерных материалов, но также оценить структуру полимера в растворах и её изменение при воздействии внешних факторов. Всё это позволит получать современные материалы с оптимальным комплексом свойств, необходимых в той или иной области применения.

#### Материалы и методы исследования

В качестве биополимера использован гиалуронат натрия марки НА-Т с молекулярной массой 1,29 МДа и мольной долей D-глюкуроновой кислоты 45,9% (BLOOMAGE FREDA BIOPHARM CO., LTD, Китай). Система растворителей включала диметилсульфоксид (ДМСО) химически чистый «ХЧ» ТУ 2635-114-44493179-08 (АО «ЭКОС-1», Россия) и дистиллированную воду ГОСТ 6709-72. Все реагенты не подвергали дополнительной очистке.

Для оценки реологических характеристик был использован программируемый ротационный вискозиметр Brookfield DV-II + Pro с термостатируемой измерительной ячейкой при постоянной температуре 23 °С с использованием цилиндрического шпинделя №64. Скорость вращения варьировалась от 1,2 до 120 об/мин для установления зависимости динамической вязкости и скоростью сдвига.

#### Экспериментальная часть

Известно, что гиалуроновая кислота в растворе способна формировать третичную структуру – спираль [12-16]. Помимо этого, уже при концентрации 1 мг/мл полимерные звенья гиалуроновой кислоты начинают перекрываться между собой, в результате чего образуются трёхмерные взаимопроникающие полимерные сетки [17], в связи с чем происходит резкое увеличение вязкости системы. Тем не менее, благодаря уменьшению вязкости при повышении напряжения, высоковязкие растворы

гиалуроновой кислоты могут быть успешно транспортированы через тонкие фильтры при получении волокон [5,6,18].

По причине высокой электропроводности, низкой испаряемости и высокого поверхностного натяжения водных растворов гиалуроновой кислоты применяют различные методы, в том числе используют бинарные смеси растворителей, например вода/диметилформамид (ДМФА) [19]. Однако ДМФА недопустим для применения в медицине, в связи с чем в работе нами впервые был использован ДМСО, разрешённый для самостоятельного применения в медицине (торговое наименование лекарственного препарата – Димексид). Предполагается, что остаточные количества ДМСО в волокнах будут оказывать противовоспалительное и местное анальгетическое действие на поражённые участки кожи.

Для упрощения эксперимента в качестве модельных были выбраны растворы, содержащие 1,5 г гиалуроната натрия на 100,0 мл растворителя. В качестве бинарного растворителя использовалась смесь дистиллированной воды и ДМСО в соотношении от 100:0 до 40:60 с шагом в 10 частей (по объёму). Увеличение содержания ДМСО в системе до 70 объёмных частей не позволило получить равномерный раствор даже после 24 ч перемешивания: в растворе остались нерастворившиеся комочки гиалуроновой кислоты, которые впоследствии могут закупорить транспортную систему питающей линии технологических устройств.

Как показано на рис. 1, динамическая вязкость растворов гиалуроновой кислоты увеличивается с ростом содержания ДМСО в системе, но с увеличением скорости сдвига различие сглаживается. Максимальной динамической вязкостью обладают растворы, содержащие воду/ДМСО в соотношении 50/50 и 40/60 (по объёму).

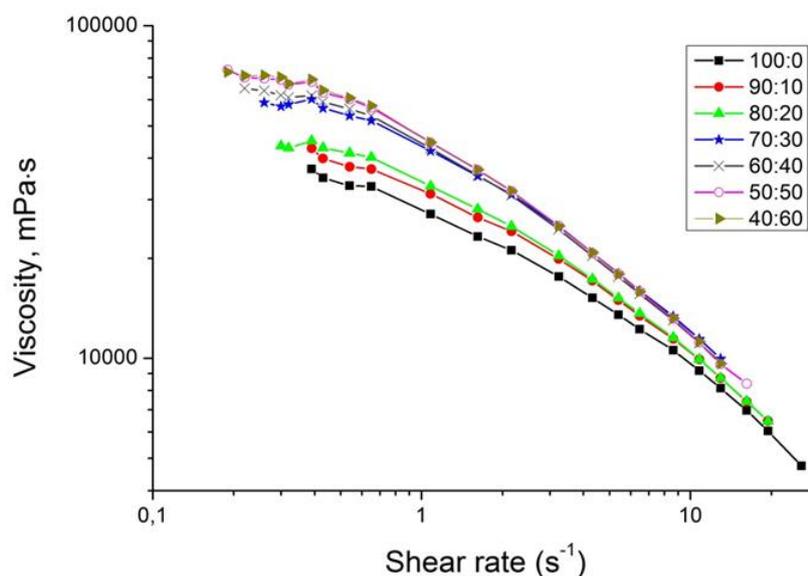


Рис. 1. Вязкость 1,5% растворов гиалуроновой кислоты с различным соотношением дистиллированной воды и ДМСО (от 100:0 до 40:60 по объёму)

Увеличение динамической вязкости при добавлении в систему органического растворителя может быть обусловлено несколькими причинами. Гиалуроновая кислота образует в растворе водородные связи: внутримолекулярные, межмолекулярные, а также с использованием воды в качестве «мостика» (см. рис. 2). При добавлении органического растворителя в смеси вода-ДМСО происходит образование более прочных водородных связей [20-22], что оказывает влияние на жесткость системы в целом и может приводить к увеличению вязкости.

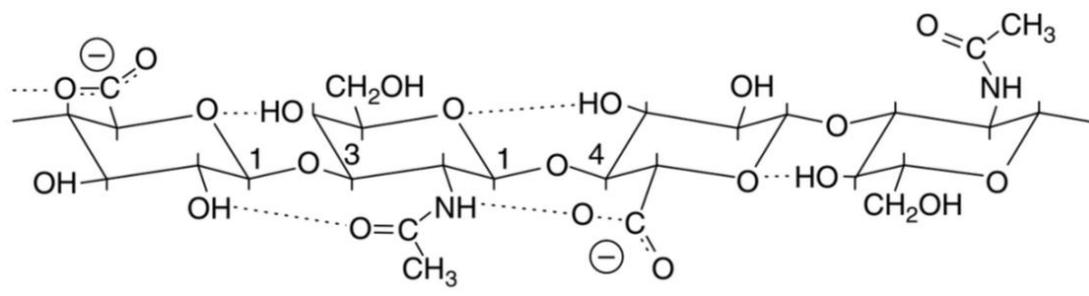


Рис. 2. Образование водородных связей гиалуроновой кислоты в растворе

Помимо образования водородных связей при смешении воды и ДМСО происходит уменьшение суммарного объёма системы [20], что приводит к увеличению концентрации полимера в растворе, и, соответственно, к увеличению вязкости.

Полученные результаты коррелируют с одним из предыдущих исследований [23], в котором авторы использовали бинарные и тернарные растворы, содержащие воду, ДМФА и метановую кислоту в различных соотношениях. Вязкость раствора гиалуроновой кислоты увеличилась при добавлении органических растворителей раствора, но при увеличении напряжения сдвига наблюдалось явление сдвигового разжижения. Авторы объясняют этот эффект разрушением водородных связей между амидными, карбоксильными и гидроксильными группами внутри молекулы гиалуроновой кислоты, отвечающими за её спиралевидную конформацию.

### Заключение

В данной работе представлены результаты исследования динамической вязкости растворов гиалуроновой кислоты, предназначенных для формирования волокон нано- и микроуровня. При этом выбор ДМСО в качестве соразтворителя обусловлен требованиями к процессу электроспиннинга, а также возможностью придания полученным материалам дополнительных лечебных свойств.

Показано, что при увеличении объёмной доли ДМСО в бинарном растворе происходит увеличение динамической вязкости, что вызвано образованием более прочных водородных связей, а также уменьшением суммарного объёма раствора. Полученные данные могут быть использованы исследователями в процессе составления рецептур растворов для получения плёнок и волокон из растворов биополимеров для разработки современных скаффолдов и раневых повязок на основе полисахаридов.

### Литература

1. Song R., Murphy M., Li C., Ting K., Soo C., Zheng Z. 2018. Current development of biodegradable polymeric materials for biomedical applications. *Drug Design, Development and Therapy*. 2018. Vol. 12. P. 3117–3145.
2. Abou-Okeil A., Fahmy H.M., El-Bisis M.K., Ahmed-Farid O.A. Hyaluronic acid / Na-alginate films. As topical bioactive wound dressings. *Eur Polym J*. 2018. Vol. 109. P. 101–109.
3. Al-Enizi A., Zagho M., Elzatahry A. 2018. Polymer-Based Electrospun Nanofibers for Biomedical Applications. *Nanomaterials*. 2018. Vol. 8. Iss. 4. P. 259.
4. Ahire J.J., Robertson D.D., van Reenen A.J., Dicks L.M.T. Polyethylene oxide (PEO)-hyaluronic acid (HA) nanofibers with kanamycin inhibits the growth of *Listeria monocytogenes*, *Biomed. Pharmacother*. 2017. Vol. 86. P. 143–148.

5. Rickman J., Tronci G., Liang H., Russell S.J. (2019). Rotation-assisted wet-spinning of UV-cured gelatin fibres and nonwovens. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. Iss. 14. P. 10529–10547.
6. Матвеев А.Т., Афанасов И.М. Получение нановолокон методом электроформования: Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» / под ред. Авдеева В.В., Алентьева А.Ю., Лазорьяк Б.И., Шорниковой О.Н. М.: Издательство МГУ. 2010. 83 с.: ил.
7. Швайчак Э. Зависимость вязкости водного раствора гиалуроновой кислоты от внешних полей. Ч. 2 // *Российский журнал биомеханики*. 2004. Т. 8. № 1. С. 98–104.
8. Осовская И.И., Антонова В.С. Вязкость растворов полимеров: учебное пособие. Издание 2-е, доп. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. 2016. 62 с.
9. Ишанходжаева М.М., Мхитарян Е.Л. Физическая химия. Полиэлектrolиты: учебно-методическое пособие. СПб.: СПбГТУРП. 2015. 40 с.
10. Anton Paar. Энциклопедия реологии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://paar.ru/upload/iblock/949/94923c60e650341562d8a6f00709f44a.pdf> (дата обращения 02.03.2020).
11. ГОСТ Р 57950-2017 (ИСО 6721-10:2015) Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 10. Комплексная вязкость при сдвиге с использованием колебательного реометра с параллельными пластинами.
12. Scott J.E., Heatley F. Hyaluronan forms specific stable tertiary structures in aqueous solution: A <sup>13</sup>C NMR study. *P. Natl. Acad. Sci. USA*. 1999. Vol. 96. Iss. 9. P. 4850–4855.
13. Almond A., Brass A., Sheehan J.K. Deducing polymeric structure from aqueous molecular dynamic simulations of oligosaccharides: prediction from simulation of hyaluronan tetrasaccharides compared with hydrodynamic and X-ray fiber diffraction data. *J. Mol. Biol.* 1998. Vol. 284. P. 1425–1437.
14. Dea I.C., Moorhouse M.R. Hyaluronic acid: a novel, double helical molecule. *Science*. 1973. Vol. 179. Iss. 4073. – P. 560–562.
15. Atkins E.D., Sheehan J.K. Hyaluronates: Relation between molecular conformations. *Science*. 1973. Vol. 179. Iss. 4073. P. 562–564.
16. Scott J.E., Cummings C., Brass A., Chen Y. Secondary and tertiary structures of hyaluronan in aqueous solution, investigated by rotary shadowing-electron microscopy and computer simulation. Hyaluronan is a very efficient network-forming polymer. *Biochem. J.* 1991. Vol. 274. P. 69–705.
17. Selyanin M.A., Khabarov V.N., Boykov P.Y. Hyaluronic acid: production, properties, application in biology and medicine / Edited by Polyak F. UK: John Wiley & Sons, Ltd. 2015. P. 215.
18. Necas J., Bartosikova L., Brauner P., Kolar J. Hyaluronic acid (hyaluronan): a review // *Veterinarni Medicina*. 2008. Vol. 53. Iss. 8. P. 397–411.
19. Li J., He A., Han C.C., Fang D., Hsiao B.S., Chu B. Electrospinning of hyaluronic acid (HA) and HA/gelatin blends // *Macromolecular Rapid Communications*. 2006. Vol. 27. Iss. 2. P. 114–120.
20. Cowie J.M.G., Toporowski P.M. Association in the binary liquid system dimethyl sulphoxide – water // *Canadian Journal of Chemistry*. 1961. Vol. 39. No. 11. P. 2240–2243.
21. Idrissi A., Marekha B.A., Barj M., Miannay F.A., Takamuku T., Raptis V., Jedlovszky P. Local structure of dilute aqueous DMSO solutions, as seen from molecular dynamics simulations. *The Journal of Chemical Physics*. 2017. Vol. 146. Iss. 23. P. 234507.
22. Wong D.B., Sokolowsky K.P., El-Barghouthi M.I., Fenn E.E., Giammanco C.H., Sturlaugson A.L., Fayer M.D. 2012. Water Dynamics in Water/DMSO Binary Mixtures. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2012. Vol. 116. Iss. 18. P. 5479–5490.

23. Liu Y., Ma G., Fang D., Xu J., Zhang H., Nie J. Effects of solution properties and electric field on the electrospinning of hyaluronic acid. *Carbohydr. Polym.* 2011. Vol. 83. P. 1011–1015.

**СОДЕРЖАНИЕ**

Направление « <b>ФОТОНИКА</b> ».....	4
<b>Аверьянов В.А.</b> РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕДА.....	5
<b>Антипенкова Д.А., Варламов П.В.</b> АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ТИТАНА.....	8
<b>Ахлебинина А.С.</b> АНАЛИЗ УТОЧНЯЮЩИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ВИДЕОЭНДОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	13
<b>Ахмеров А.Х.</b> ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН.....	18
<b>Бененсон Е.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ТРЁХКООРДИНАТНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	25
<b>Бокатый И.О., Денисов В.М., Рыжова В.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ.....	29
<b>Булыга Д.В., Лебедев В.Ф.</b> АНАЛИЗ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА СИНТЕТИЧЕСКИХ НРНТ АЛМАЗОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....	35
<b>Быков Д.И.</b> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АНОМАЛОСКОПА.....	41
<b>Воробьева Т.В., Сечак Е.Н., Демин А.В.</b> РАЗРАБОТКА ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА.....	44

<b>Денисов А.О.</b> КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ПОМОЩЬЮ ОДНОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.....	48
<b>Динь Б.М., Тимофеев А.Н.</b> ПОСТРОЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ СОРТИРОВКИ ФРУКТОВ ПО ФОРМЕ, РАЗМЕРУ И ЦВЕТУ.....	51
<b>Куштысева Ю.О., Калинин О.С.</b> АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА (КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛИНОМОВ ЦЕРНИКЕ) ПО ФРТ.....	57
<b>Кожина А.Д., Цыганок Е.А., Андреев Л.Н.</b> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СПЕКТРА.....	64
<b>Ле Куок Фам</b> СВОЙСТВА ПВХ НАНОВОЛОКОН, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ.....	70
<b>Лебедев В.Е.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ МИКРОСКОПИИ.....	75
<b>Наседкин Б.А., Вьюнышев А.М.</b> ИСТОЧНИК КОРРЕЛИРОВАННЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО КРИСТАЛЛА ТИТАНИЛ-ФОСФАТА КАЛИЯ.....	78
<b>Сидорова Л.А., Рыжова В.А.</b> ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НАЧАЛЬНОГО И СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	82
<b>Феоктистова Д.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОТОЛИТОГРАФИИ ДЛЯ КЕРМЕТА И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ.....	89
<b>Фомин Д.И.</b> СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	92
<b>Хлынов Р.Д., Рыжова В.А.</b> МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРОВИ.....	98
<b>Яковлев А.И., Тимофеев А.Н.</b> ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРОГИБОМЕРА С ЕДИНЫМ МАТРИЧНЫМ ПОЛЕМ.....	105

<b>Клепова А.Н.</b> ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	112
<b>Ласкавый Н.С.</b> РАЗРАБОТКА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕДАТЧИКА НА ОСНОВЕ МОДУЛЯТОРА МЗМ-Х-014.....	117
<b>Родикова Л.С., Кортаев В.В., Тимофеев А.Н.</b> О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВИДЕОЭНДОСКОПИРОВАНИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА РАБОЧИХ ЛОПАТОК СТУПЕНЕЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН.....	121
<b>Снетков П.П., Захарова К.С., Тянутова М.И., Иванов А.Ю.</b> РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ.....	127

# АЛЬМАНАХ НАУЧНЫХ РАБОТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО

Том 4

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Вёрстка

Я.Я. Платунова

Подписано к печати 25.11.2020

Заказ № 4372 от 25.11.2020

Тираж 100 экз.

Печатается в авторской редакции

---

Отпечатано: Учреждение «Университетские коммуникации»  
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16