

# СБОРНИК РАБОТ АСПИРАНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,

победителей конкурса грантов  
Правительства Санкт-Петербурга

```
INT MAIN()  
{  
  cout <<  
  "HELLO, WORLD!"  
  << endl;  
  return 0; }
```



Санкт-Петербург  
2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,  
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО,  
победителей конкурса грантов  
Правительства Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург

2014 г.

**Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифоров – СПб.: Университет ИТМО, 2014. – 301 с.**

Сборник содержит работы аспирантов Университета ИТМО, удостоенных премии Правительства Санкт-Петербурга, победителей конкурса грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Научные отчеты по результатам выполнения грантов издаются с целью демонстрации достижений аспирантов университета, стимулирования их участия в научных исследованиях, повышения качества подготовки специалистов с высшим образованием и формирования резерва для кадров высшей квалификации.

ISBN 978-5-7577-04-83-8

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики, 2014

Авторы, 2014



*Победители конкурса грантов на церемонии награждения*

В 2009 г. нашему вузу по итогам Всероссийского конкурсного отбора программ развития университетов была присвоена категория национального исследовательского университета (НИУ) – вуза одинаково эффективно осуществляющего образовательную и научную деятельность на основе принципов интеграции науки и образования. Один из важнейших отличительных признаков НИУ – наличие высокоэффективной системы подготовки кадров высшей квалификации – аспирантов и докторантов (в том числе из других вузов), а также переподготовки научных кадров и повышения квалификации.

За прошедшие четыре года реализации программы развития Университета ИТМО число аспирантов в нашем вузе увеличилось с 456 человек в 2009 г. до 700 – в 2013 г. В вузе действует система финансовой поддержки научных достижений молодых ученых. Они имеют возможность публиковаться в четырех научных журналах, выходящих на базе университета: «Известия вузов. Приборостроение», «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики», «Оптический журнал» и «Наносистемы: физика, химия, математика», и трех электронных изданиях: Научный журнал Университета ИТМО Серии «Процессы и аппараты пищевых производств», «Экономика и экологический менеджмент», «Холодильная техника и кондиционирование». Результаты своих исследований аспиранты представляют на ежегодно организуемых вузом Всероссийском конгрессе молодых ученых, Научно-технической и учебно-методической конференции, а также на научных конференциях и семинарах, проводимых факультетами и кафедрами.

Важную роль в поддержке научных исследований молодежи играет ежегодный конкурс грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Аспиранты Университета ИТМО на протяжении всех лет существования этого конкурса принимают в нем активное участие, благодаря чему по общему числу выигранных грантов наш университет в последние годы занимает второе-третье место среди всех вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Число победителей конкурса грантов в 2012 г. составило 29, а 2013 г. возросло до 43 человек.

Итогом развития научной деятельности Университета ИТМО явилось включение нашего вуза в число 15 вузов страны, прошедших в программу повышения конкурентоспособности среди ведущих международных научных и образовательных центров.

В настоящий сборник вошли работы аспирантов – победителей конкурса грантов 2013 г. Работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых молодыми учеными Университета ИТМО под руководством ведущих специалистов вуза.

*Проректор, д. т. н., проф. В.О. Никифоров*

## СОДЕРЖАНИЕ

Разработка и исследование методов и средств измерения на основе позиционно-чувствительных приемников <i>О.А. Абакишина</i> .....	6
Синтез алгоритма управления следящего электропривода с упругими связями <i>А.А. Абдуллин</i> .....	11
Исследование и разработка принципов построения оптико-электронной системы технологической оценки минеральных объектов <i>А.А. Алёхин</i> .....	25
Влияние эффекта якоря при прогнозировании инфляции <i>А.В. Белых</i> .....	33
Обеспечение устойчивого развития кластеров на основе организационной модели взаимодействия механизма управления и самоорганизации <i>И.А. Борисова</i> .....	40
Исследование процессов формирования объемных периодических полимерных структур в интерференционных световых полях <i>В.Г. Булгакова</i> .....	53
Государственно-частное партнерство как инструмент совершенствования технологической структуры в сфере ЖКХ <i>С.А. Горячий</i> .....	64
Разработка и исследование количественного теневое метода, основанного на применении средств компьютерной изофотометрии <i>М.Е. Зацепина</i> .....	75
Компактный считыватель для люминесцентных меток с высокой информационной емкостью, создаваемых на основе квантоворазмерных структур <i>А.С. Златов</i> .....	82
Комплекс для исследования автоматного управления роботами <i>А.И. Калинин</i> .....	88
Исследование оптико-электронной системы контроля трехмерного изгиба нефтепроводов <i>А.И. Коняхин</i> .....	95
Разработка системы разделения дикторов на фонограмме <i>О.Ю. Кудашев</i> .....	105
Методы биотехнологии в создании новых форм белковой пищи из люпина <i>Л.М. Кузнецова</i> .....	111
Разработка методов и алгоритмов трехмерного моделирования печатных узлов <i>О.В. Кузнецова</i> .....	122
Микрофлюидные устройства для исследования биологических объектов методами микроскопии высокого разрешения <i>И.В. Кухтевич</i> .....	135
Статика и динамика мембранных и пластинчатых электромеханических элементов систем управления <i>Р.Я. Лабковская</i> .....	149
Контроль химического состава зеленого щелока по спектрам ультрафиолетового поглощения в процессах регенерации варочного раствора при сульфатном способе производства целлюлозы <i>С.Н. Лапинов</i> .....	154
Исследование флуоресценции наночастиц из комплексов лантанидов, допированных двумя различными красителями <i>Л.Ю. Миронов</i> .....	163

Неорганические люминофоры, активированные ионами редкой земли и переходных металлов, для энергоэффективных источников белого света <i>Я.А. Некрасова</i> .....	169
Исследование системы для контроля удлинения штока поршня во время ресурсных испытаний клапанов <i>Е.Н. Пантюшина</i> .....	178
Описание процессов фазового разделения в комплексных полимерных системах <i>А.В. Подшивалов</i> .....	187
Проектирование энергоэффективных преобразователей напряжения с компенсацией реактивной составляющей полной мощности и коррекцией гармонического состава сетевого тока <i>Н.А. Поляков</i> .....	202
Разработка и применение способов оценки динамической остроты зрения <i>Ю.А. Ротц</i> .....	215
Разработка инструментальной цепочки программирования купнозернистого реконфигурируемого аппаратного ускорителя <i>А.С. Румянцев, И.С. Рубина</i> .....	229
Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по известным значениям в узлах <i>Е.И. Сергеева</i> .....	240
Численное моделирование системы морской ледостойкой платформы для программно-аппаратного комплекса по подготовке специалистов по освоению российского континентального шельфа <i>Р.И. Смирнов</i> .....	245
Исследование возможностей фурье-метода контроля малых линейных и угловых перемещений <i>Ю.А. Соколов</i> .....	258
Структурно-химический анализ полупроводниковых квантовых точек CdHgSe методом резонансного комбинационного рассеяния <i>С.А. Черевков</i> .....	275
Разработка технологии гидролиза отработанных пивных дрожжей для получения продукта с наперед заданными свойствами <i>Т.В. Чичина</i> .....	282
Система удаленного управления мехатронными комплексами <i>С.В. Шаветов</i> ...	294



Абакшина Ольга Александровна  
Факультет фотоники и оптоинформатики  
Кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики  
E-mail: olenka-ost@mail.ru

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИЕМНИКОВ

О.А. Абакшина

Научный руководитель – доцент С.С. Митрофанов

В течение длительного времени в приборостроении предпринимаются попытки создания простых средств, способных автоматически измерять перемещения тех или иных точек объекта при контроле его геометрических параметров. Пока не удалось создать эффективных средств измерения, которые могли бы удовлетворять как лабораторным условиям, так и производственным.

Целью представленной работы является исследование возможности использования позиционно-чувствительных приемников (на примере приемника «мультискан») в приборах для линейных измерений.

Мультискан (рис. 1) представляет собой линейку фотоприемных элементов (фотодиодов) и систему обрамления (резистивный слой), обеспечивающую предварительную обработку изображения.

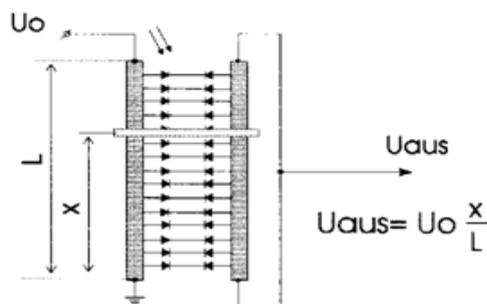


Рис. 1. Позиционно-чувствительный приемник «мультискан»

В режиме координатоуказателя «мультискан» имеет следующие параметры:

- рабочее поле 18 мм;
- минимальная мощность светового пятна  $10^7$  Вт;
- область спектральной чувствительности 180–1060 нм.

В этом режиме на один из делительных слоев мультискана подается опорное напряжение, а с другого снимается напряжение сигнала, пропорциональное координате светового пятна на нем (рис 1).

$$U_{aus} = U_o \frac{x}{L}.$$

Преимущество этого приемника заключается в реализации режима непрерывного слежения за текущим значением координаты светового сигнала. Оно осуществляется за счет уникальных характеристик фотоприемника: высокой разрешающей способности и возможности фильтрации фототоков посторонних засветок, превышающих величину полезного сигнала более чем в 1000 раз. Высокая точность метода обусловлена тем, что определяется положение такого устойчивого признака оптического сигнала как его медиана. Функциональная схема индикатора, созданного на основе мультискана, представлена на рис. 2, а разработанный макет – на рис. 3.

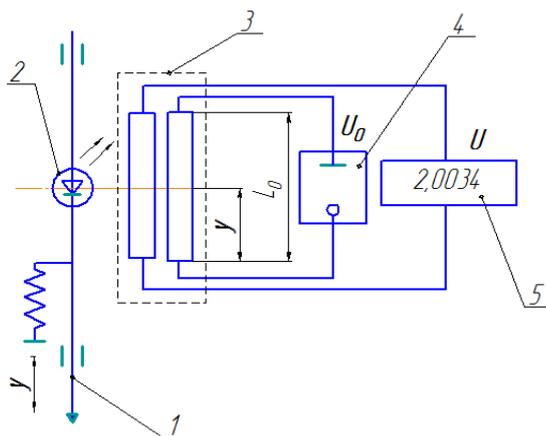


Рис. 2. Функциональная схема индикатора на базе мультискана:

1 – измерительный шток; 2 – источник излучения;

3 – фотоприемник «мультискан»; 4 – электронный блок; 5 – цифровой дисплей

При перемещении измерительного штока 1 происходит смещение центра светового пятна, создаваемого светодиодом 2, на светочувствительной площадке мультискана 3, с которого снимается аналоговый электрический сигнал  $U$ .

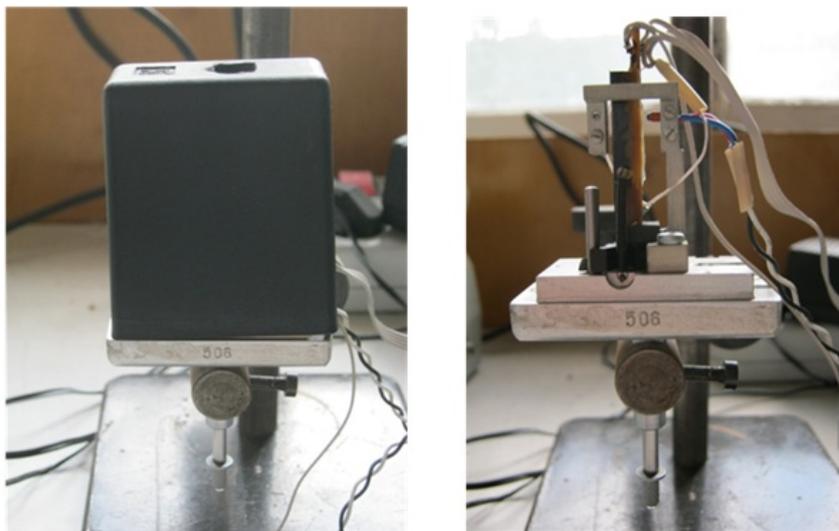


Рис. 3. Макет индикатора

Функциональная схема сферометра на базе индикатора с фотоэлектрическим приемником «мультискан» представлена на рис. 4, а его макет – на рис. 5.

Мультискан, который используется в качестве чувствительного элемента для снятия показаний в автоколлиматоре, позволяет расширить диапазон измерения углов и увеличить быстродействие прибора. С целью определения нелинейности и нестабильности характеристик мультискана при проведении измерений на автоколлиматоре в диапазоне от  $0^\circ$  до  $2^\circ$  были выполнены исследования на лабораторной установке (рис. 6).

Функциональная схема установки (рис. 8) представляет собой фотоэлектрический автоколлиматор 1 (рис. 7), где в качестве чувствительного элемента используется мультискан 2. Для проверки характеристик приемника в качестве эталонного средства измерения используется теодолит с установленным на нем зеркалом 3. Величина напряжения, снимаемого с выхода мультискана, фиксируется цифровым вольтметром 4.

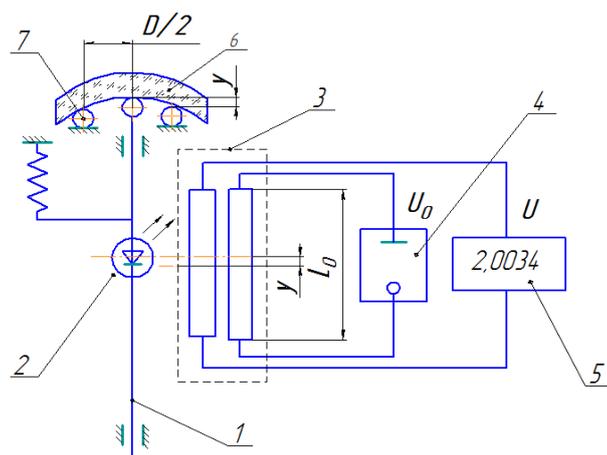


Рис. 4. Функциональная схема прибора для контроля радиусов кривизны оптических деталей:  
 1 – измерительный шток; 2 – источник излучения; 3 – мультискан;  
 4 – источник опорного напряжения; 5 – цифровой вольтметр (ПК);  
 6 – измеряемая деталь; 7 – сферическая опора



Рис. 5. Макет сферометра

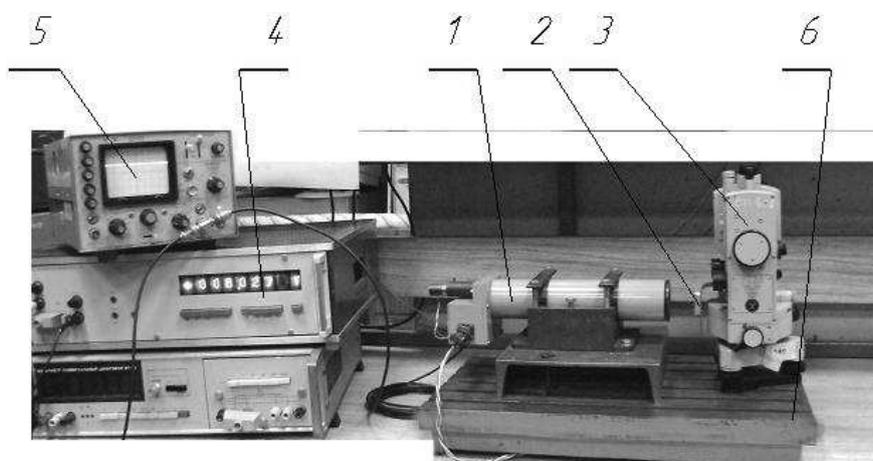


Рис. 6. Лабораторная установка для исследования характеристик мультискана:  
 1 – фотоэлектрический автоколлиматор с приемником «мультискан»; 2 – зеркало;  
 3 – теодолит 2Т2А; 4 – вольтметр прецизионный G1202.010; 5 – осциллограф;  
 6 – монтажная плита

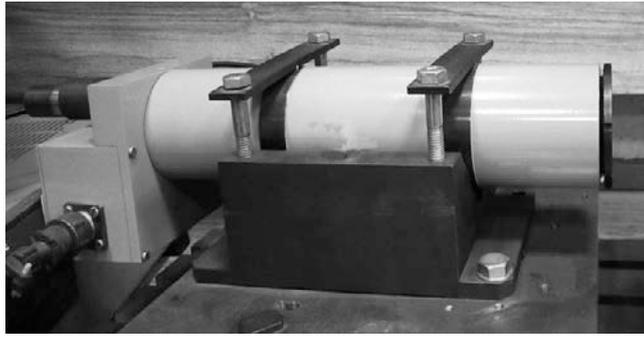


Рис. 7. Внешний вид автоколлиматора

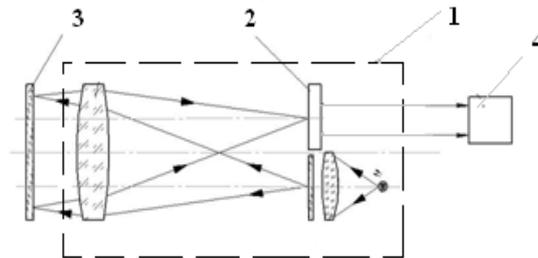


Рис. 8. Функциональная схема автоколлиматора

График зависимости выходного напряжения мультискана от угла наклона зеркала (нелинейности), задаваемого теодолитом, представлен на рис. 9.

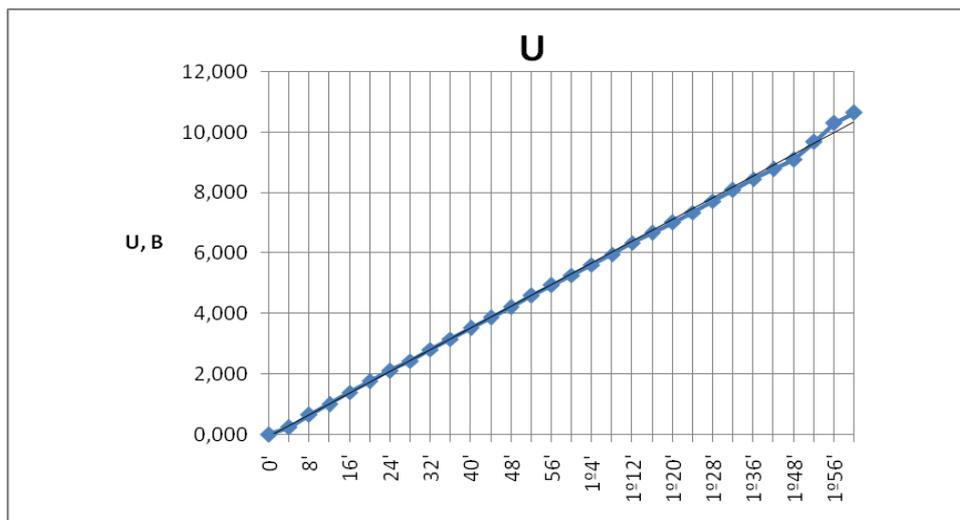


Рис. 9. График нелинейности мультискана

Из графика видно, что зависимость выходного напряжения от угла в диапазоне от  $0^\circ$  до  $2^\circ$  практически линейна. При этом погрешность измерений углов составила  $2,4''$  или  $0,003\%$  от всего диапазона измерения.

Величина нестабильности мультискана определялась на этой же установке. Проводилось три серии измерений, показания вольтметра снимались каждые 60 с в течение часа. Результаты измерений представлены в виде графиков на рис. 10.

Из полученных экспериментальных данных следует, что величина нестабильности измерений не превышает  $0,002$  В. Благодаря введению мультискана расширился также диапазон измерения автоколлиматора.

Существенным преимуществом использования мультискана в автоколлиматорах является его высокое быстродействие, позволяющее измерять углы в динамическом режиме, малое число элементов конструкции и, следовательно, высокая надежность.

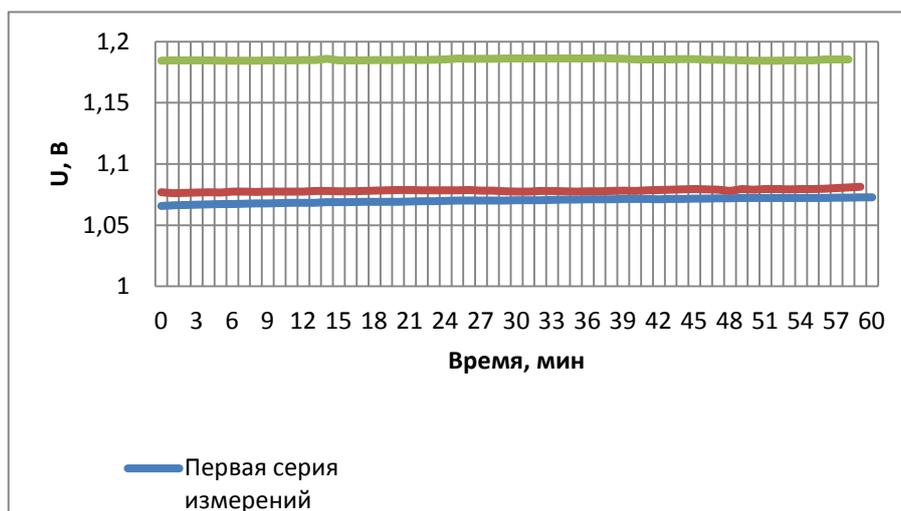


Рис. 10. Графики нестабильности мультискана

Дальнейшие исследования погрешностей и их компенсации в приборах на основе приемника «мультискан» будут представлены в следующих работах.

### Выводы

Проведенные исследования на базе указанных выше макетов подтвердили возможность использования позиционно-чувствительных приемников в приборах для линейно-угловых измерений.

В процессе выполнения проекта разработаны функциональные схемы: индикатора для линейных измерений (рис. 2), прибора для контроля радиусов кривизны (рис. 4) и автоколлиматора (рис. 8); изготовлены макеты индикатора для линейных измерений и прибора для контроля радиусов кривизны (сферометр); проведены исследования точностных характеристик индикатора и сферометра; изготовлен автоколлиматор и установка для исследований его основных характеристик.

### Публикации

1. Абакшина О.А., Латыев С.М. Модернизация фотоэлектрического индикатора. XXXVIII Неделя науки СПбГПУ//Материалы международной научно-практической конференции. СПб. Издательство Политехнического университета-2009, Ч. 9, с. 156-158.
2. Абакшина О.А. Модернизация фотоэлектрического индикатора. СПб, ООО «КРОМ», 2010 г. Пятнадцатая Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации работ победителей конкурса грантов правительства Санкт-Петербурга 2010 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук.
3. Абакшина О.А., Егоров Г.В., Латыев С.М., Митрофанов С.С. Модернизация конструкции фотоэлектрических индикаторов линейных перемещений, СПб, ООО «А-принт», Приборостроение 11, 2011 г., с. 65-68.
4. Абакшина О.А., Егоров Г.В., Латыев С.М., Митрофанов С.С. Фотоэлектрические приборы и устройства, основанные на позиционно-чувствительных приемниках, СПб, ООО «А-принт», Приборостроение 4, 2012 г., с. 88-90.
5. Абакшина О.А., Митрофанов С.С. Фотоэлектрический автоколлиматор на базе приемника Мультискан, Восточное партнерство – в печати.



**Артур Александрович Абдуллин**  
Факультет компьютерных технологий и управления  
Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем  
E-mail: artur.abdullin@gmail.com

## **СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ**

А.А. Абдуллин

Научный руководитель – профессор В.Н. Дроздов

### **Введение. Цели и задачи**

К настоящему времени достигнуты исключительно высокие успехи в разработке аппаратного обеспечения прецизионного электропривода. В связи с этим существенно возрастают требования к алгоритмам регуляторов, гарантирующим как можно более полное раскрытие возможностей современной аппаратуры. В соответствии с этим ведутся непрерывные поиски по совершенствованию структуры и методов синтеза систем управления прецизионным электроприводом.

Объектом исследования в настоящей работе является следящий электропривод азимутальной оси опорно-поворотного устройства (ОПУ) большого телескопа ТИ-3,12 м. Предполагается, что азимутальная ось ОПУ является нежесткой, и ее механизм представляется двухмассовой расчетной моделью. Такая модель корректна, если вилка со всеми элементами угломестной оси и трубой телескопа может быть представлена твердым телом. Возможно также пренебрежение упругостью вала азимутальной оси в зоне между верхним и нижним поясами подшипников. Это предположение с достаточной достоверностью подтверждается на практике.

Следящие электроприводы осей, как правило, строятся по структуре с подчиненным регулированием параметров. В системе управления с такой структурой существует проблема возникновения автоколебаний, связанных с наличием нагрузки типа «сухое трение» и определяющих нижнюю границу диапазона скоростей плавного слежения.

Снижение нижней границы диапазона скоростей плавного слежения возможно при расширении полосы пропускания системы за счет введения дополнительных обратных связей по скорости и углу поворота второй массы. Для рассматриваемого объекта удалось расширить полосу пропускания в четыре раза и пропорционально снизить границу диапазона скоростей плавного слежения до значения 0,375 угл. сек/с. [1].

Помимо возникновения автоколебаний в системе подчиненного регулирования параметров используется искусственное введение нулей в передаточную функцию регулятора для сокращения больших постоянных времени объекта управления, что может привести к потере управляемости и наблюдаемости. По этой причине целесообразно исследовать другие подходы к синтезу регуляторов. Перспективным в этом плане является метод пространства состояний, широко используемый в настоящее время в теории управления.

В 1980-х гг. начинались исследования по применению метода пространства состояний в теории электропривода, например, под руководством профессора Ю.А. Борцова в ЛЭТИ. Но они не получили должного развития. Частичным объяснением этого может служить недостаточное развитие программных средств, позволяющих реализовывать с приемлемой точностью и скоростью сложные вычислительные процедуры, присущие методу пространства состояний.

С тех пор на рынке появились мощные математические пакеты, во многом снимающие вычислительные проблемы, связанные с методом пространства состояний. Среди современных математических пакетов особо следует выделить Matlab. Он в наибольшей степени ориентирован на выполнение процедур синтеза алгоритмов управления

и последующую проверку свойств спроектированной системы благодаря развитым средствам моделирования динамических систем.

На основании сказанного вполне оправдан интерес к применению метода пространства состояний для проектирования систем управления прецизионным электроприводом. При этом альтернативой структуре с подчиненным регулированием параметров может служить синтез алгоритма управления по принципу грубого управления вынужденным движением.

Целью проекта является разработка системы управления следящего электропривода с упругими связями, обеспечивающей требуемую среднеквадратическую ошибку в заданном диапазоне скоростей плавного слежения и в режиме покоя в условиях неполной информации о состоянии объекта.

Поставленная цель требует выполнения следующих задач:

1. Синтез алгоритма управления по принципу грубого управления вынужденным движением.
2. Синтез наблюдателя пониженной размерности для оценки только неизмеряемых переменных.
3. Моделирование разработанной системы управления в пакете прикладных программ Matlab/Simulink.

### Математическая модель объекта управления и описание внешних воздействий

Метод пространства состояний предполагает следующую постановку задачи. Исходными данными для проектирования системы управления являются математическая модель объекта управления (ОУ), модели внешних воздействий, критерий качества, описывающий желаемые свойства проектируемой системы. Необходимо спроектировать алгоритм регулятора, оптимизирующий заданный критерий качества. Дополнительно может быть оговорен тип регулятора – аналоговый, либо дискретный. В первом случае алгоритм регулятора имеет вид дифференциального уравнения, а во втором – разностного уравнения, рекуррентной процедуры.

Проанализируем подробнее исходные данные в задаче синтеза.

С максимальной ответственностью необходимо относиться к составлению модели ОУ. В принципе не существует модели полностью адекватной любому физическому объекту, поэтому, прежде всего, необходимо выбрать такую расчетную схему (динамическую модель), которая в максимальной степени отражает существенные особенности типовых режимов функционирования ОУ. Это сложная и до сих пор слабо формализованная задача. Проблема построения моделей существенно обострилась в связи с распространением принципа встраивания электромеханического преобразователя в технологическую машину.

По данным разработчика ОПУ телескопа ТИ-3,12 м расчетные параметры двухмассовой модели механизма азимутальной оси следующие: момент инерции первой массы  $J_1 = 6600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , момент инерции второй массы  $J_2 = 197300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , коэффициент жесткости  $k_s = 8,62 \cdot 10^8 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ , момент нагрузки на валу двигателя  $M_f = 800 \text{ Н}\cdot\text{м}$  типа «сухое трение», момент нагрузки на второй массе  $M_w$  – ветровой с заданной спектральной плотностью и максимальным значением до  $3500 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Структурная схема ОУ [2–4] представлена на рис. 1.

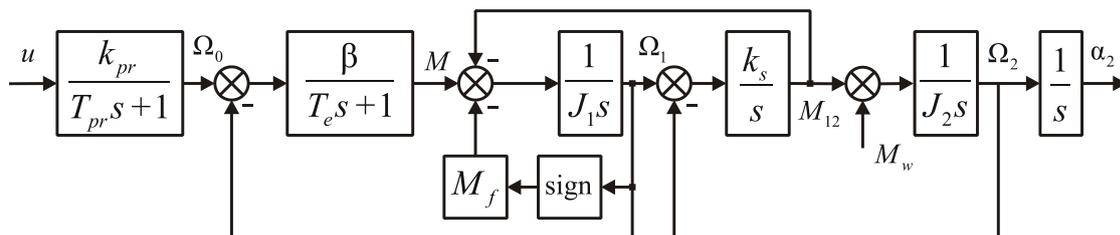


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

На рис. 1  $k_{pr} = 0,026 \text{ 1/(В}\cdot\text{с)}$ ,  $T_{pr} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  – коэффициент усиления и постоянная времени управляемого электрического преобразователя соответственно,  $\beta = 2,9 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  – коэффициент механической жесткости,  $T_e = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  – электрическая постоянная времени двигателя.

Вектор переменных состояния электромеханической системы (ЭМС), представленной на рис. 1, имеет вид:

$$x = [\Omega_0 \quad M \quad \Omega_1 \quad M_{12} \quad \Omega_2 \quad \alpha_2]^T, \tag{1}$$

где  $\Omega_0$  – скорость холостого хода,  $M$  – двигательный момент,  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  – скорости вращения первой и второй массы механизма соответственно,  $M_{12}$  – момент упругих сил,  $\alpha_2$  – угловое положение второй массы.

Учитывая значения моментов инерции механизма, можно предположить, что  $T_{pr}$  и  $T_e$  незначительны по отношению к постоянной времени механизма  $T_m = 15 \text{ с}$ . Следовательно, вектора быстрых и медленных переменных состояния принимают вид [5]:

$$x_B = [\Omega_0 \quad M]^T, \tag{2}$$

$$x_M = [\Omega_1 \quad M_{12} \quad \Omega_2 \quad \alpha_2]^T. \tag{3}$$

Полагая равными нулю малые постоянные времени, получим упрощенную ЭМС, структурная схема которой представлена на рис. 2.

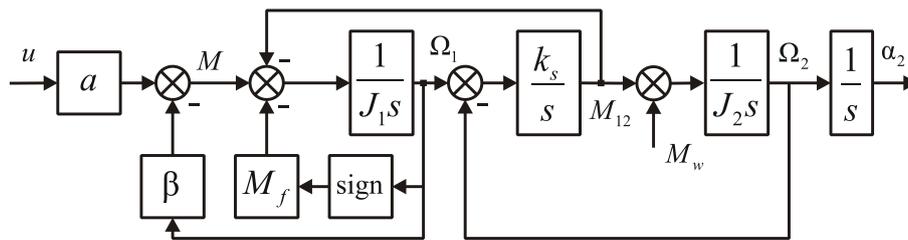


Рис. 2. Упрощенная структурная схема объекта управления

Здесь  $a = k_{pr} \cdot \beta \approx 750 \text{ Н}\cdot\text{м/В}$  – коэффициент передачи по моменту.

При этом уравнение момента принимает вид:

$$M = au - \beta\Omega_1. \tag{4}$$

Структурной системе, представленной на рис. 2, соответствует система линейных уравнений состояния (5). Следует заметить, что эта система справедлива при пренебрежимо малых значениях демпфирующего момента механизма оси, что в действительности имеет место.

Адекватное описание внешних воздействий на ОУ в процессе синтеза алгоритма управления в значительной степени определяет успех функционирования системы в реальных условиях. Внешние воздействия в современной теории управления принято рассматривать как выходы фиктивных, а в системах программного слежения и реальных генераторов командного сигнала. Исходные данные для проектирования таких генераторов обычно оговариваются в задании на проектирование системы.

$$\begin{cases} \frac{d\Omega_1}{dt} = \frac{au}{J_1} - \frac{\beta\Omega_1}{J_1} - \frac{M_{12}}{J_1} - \frac{M_f}{J_1}, \\ \frac{dM_{12}}{dt} = k_s (\Omega_1 - \Omega_2), \\ \frac{d\Omega_2}{dt} = \frac{M_{12}}{J_2} - \frac{M_w}{J_2}, \\ \frac{d\alpha_2}{dt} = \Omega_2. \end{cases} \quad (5)$$

Момент сухого трения при моделировании имеет большое значение, прежде всего потому, что система работает на очень низких скоростях – порядка угловых секунд в секунду. Момент сухого трения имеет вид знако-изменяющейся величины, знак которой зависит от направления движения привода. График зависимости представлен на рис. 3.

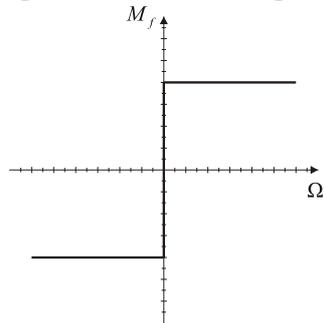


Рис. 3. Зависимость момента сухого трения от скорости

В интерактивной среде Simulink пакета прикладных программ Matlab есть блок моделирования сухого и вязкого трения «Coulomb and viscous friction» на вход которого подается сигнал скорости. Однако этот блок имеет существенный недостаток, так как не учитывает момент времени, когда создаваемый двигателем момент меньше момента сухого трения и система стоит. В таком режиме момент сухого трения приводит систему в движение, являясь, таким образом, динамическим моментом, что принципиально не верно.

Предлагается следующая модель момента сухого трения, блок схема которой представлена на рис. 4а. На рис. 4б представлен блок Embedded Matlab Function и код программы.

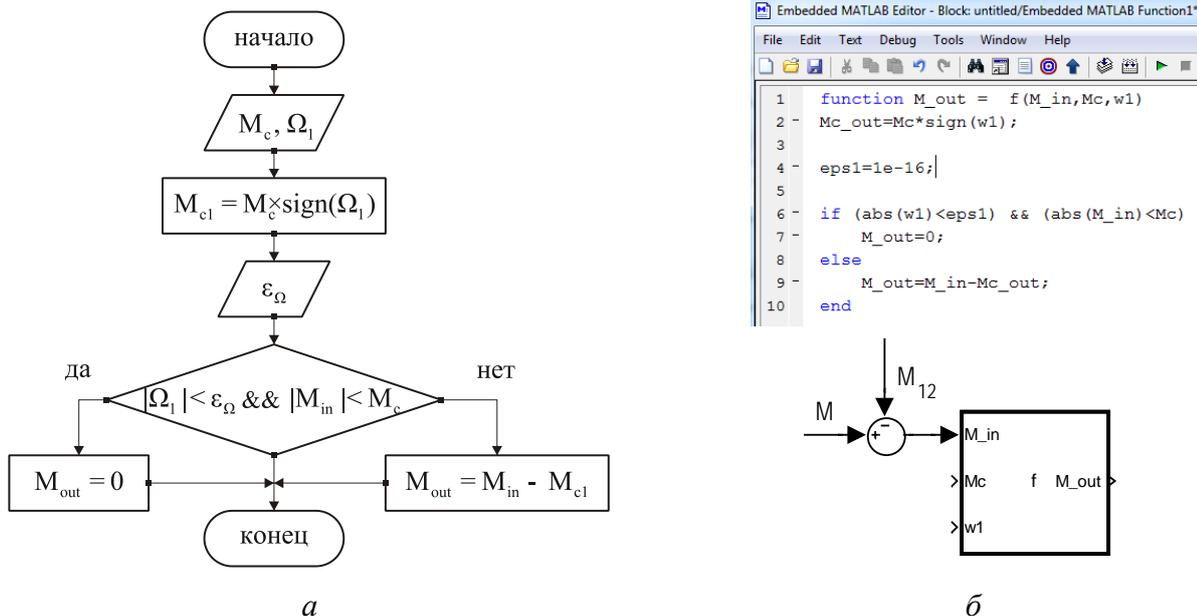


Рис. 4. Модель сухого трения: а – блок схема; б – реализация в среде Simulink

Эта модель работает следующим образом: на вход блока Embedded Matlab Function подается разность двигательного момента и момента упругости  $M_{in} = M - M_{12}$  – входной динамический момент, значение момента сухого трения –  $M_f$  и скорости первой массы –  $\Omega_1$ . На следующем этапе определяется знак момента сухого трения, вводится  $\varepsilon_\Omega$  – значение скорости первой массы, ниже которой скорость считается нулевой.

Далее выполняется проверка. Если скорость первой массы равна нулю, то есть меньше значения  $\varepsilon_\Omega$ , и входной динамический момент меньше момента сухого трения, то результирующий динамический момент на выходе блока равен нулю и система стоит. Если не выполняется хотя бы одно из условий, то результирующий момент вычисляется как разность входного динамического момента и момента сухого трения. При этом, если результирующий динамический момент меньше нуля, это значит, что момент сухого трения помогает системе остановиться, в противном случае момент сухого трения действует как момент сопротивления на валу.

Помимо момента сухого трения, действующего на первую массу, на вторую массу действует ветровая нагрузка. Информация о ней поступает от разработчика ОПУ в виде таблицы значений спектральных плотностей мощности ветрового момента, при средней скорости ветра 10 м/с в интервале частот от 0,001 до 10 Гц.

Для получения математической модели этого воздействия представим, что ветровая нагрузка формируется как белый шум, проходящий через некоторый окрашивающий фильтр, передаточная функция которого пока не известна. Для такой системы имеем соотношение

$$S_y = |W_f|^2 S_{wn}, \tag{6}$$

где  $S_{wn}$  – спектральная плотность мощности белого шума,  $S_y$  – спектральная плотность мощности выходного сигнала, то есть ветра,  $W_f$  – амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) окрашивающего фильтра.

Выберем такой белый шум, спектральная плотность мощности которого  $S_{wn} = 1$ , тогда амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) окрашивающего фильтра определяется соотношением

$$|W_f| = \sqrt{S_y}. \tag{7}$$

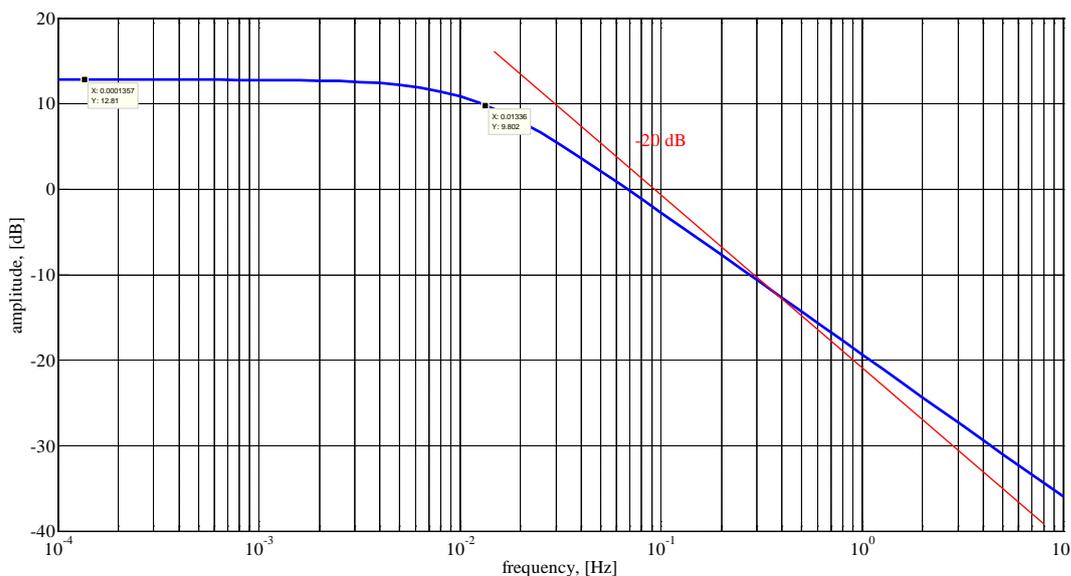


Рис. 5. АЧХ окрашивающего фильтра

Как видно на рис. 5, наклон АЧХ близок к значению -20 дБ/дек, что соответствует наклону АЧХ апериодического звена. Таким образом, представим модель ветровой нагрузки в виде последовательного включения блоков белого шума и апериодического звена. Постоянная времени составляет  $T_f = 1/0,013 = 76,9$  с, коэффициент усиления выбирается

исходя из заданного максимального значения ветрового момента. Некоторые из реализаций такой модели представлены на рис. 6.

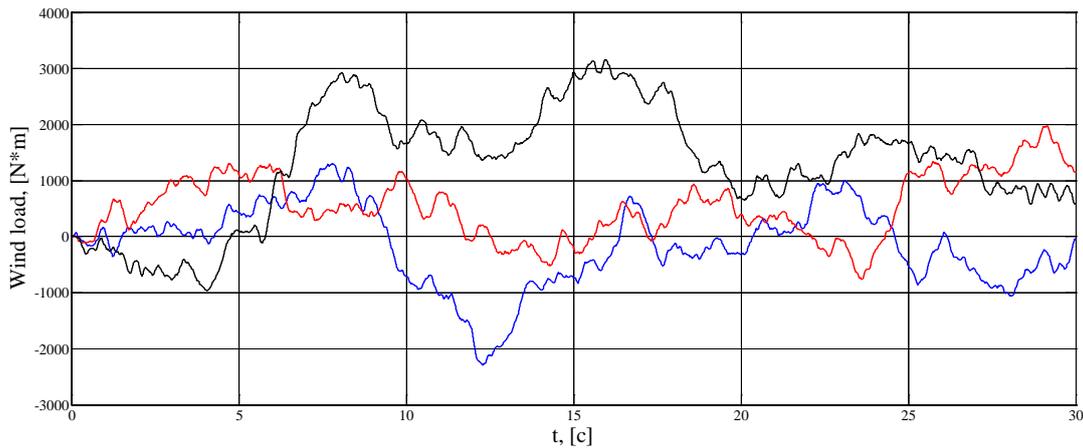


Рис. 6. Характеристика ветровой нагрузки

### Синтез алгоритма управления

Для процедуры синтеза основным является наличие математической модели ОУ в любом виде, например, в виде уравнений состояния (5). В векторно-матричной форме эта система имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (8)$$

Матрицы состояния и управления соответственно выглядят:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\beta}{J_1} & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 \\ C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{a}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Предполагается также, что известен характер возмущающего воздействия и условия работы проектируемой системы, то есть известен характер задающего воздействия в виде его математической модели.

Достаточно медленное изменение угловых координат объекта слежения позволяет аппроксимировать задающее воздействие кусочно-линейной функцией [6]. Схема моделирования такого воздействия представляет собой последовательное соединение двух интеграторов.

Для решения задачи управления будем использовать принцип грубого управления вынужденным движением, суть которого состоит в том, что в разомкнутой системе должна присутствовать модель внешнего воздействия [7]. В нашем случае это два последовательно включенных интегратора. Другими словами, проектируемая система должна обладать астатизмом второго порядка.

Обеспечение астатизма второго порядка в такой системе возможно двумя способами:

- введением в контур управления двух последовательно включенных интеграторов;
- использованием ОУ.

Второй метод предполагает наличие в модели ОУ свободных, не охваченных обратной связью интеграторов. В исследуемом объекте это интегратор, выходом которого является положение второй массы  $a_2$ .

На рис. 7 представлена структурная схема, с астатизмом второго порядка, реализованным вторым способом.

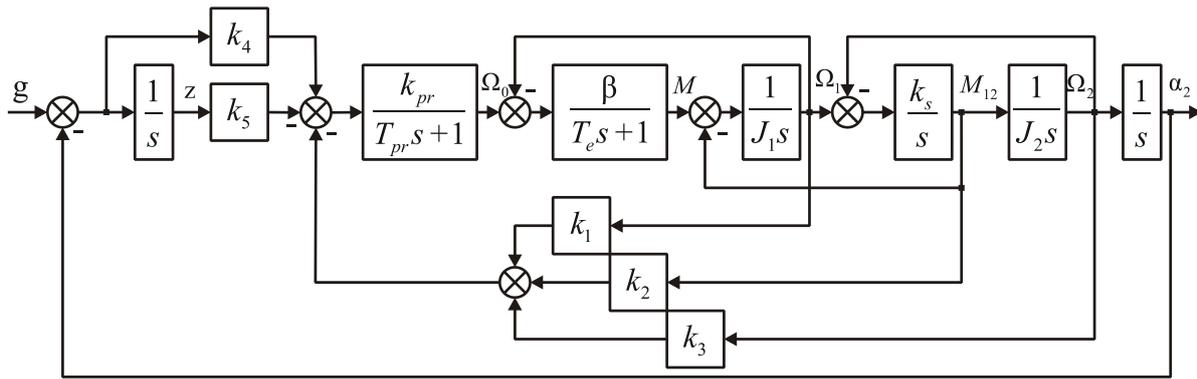


Рис. 7. Структурная схема ОУ с системой управления

Здесь модель внешнего воздействия формируется из одного введенного интегратора и интегратора ОУ. Такая система получилась за счет переноса связи по положению второй массы. Модифицируем разомкнутую систему по отношению к главной отрицательной обратной связи так, чтобы в замкнутой системе оставить обратную связь по положению и сохранить астатизм.

Уравнения состояния такой системы, включают уравнения ОУ и уравнение состояния введенного интегратора:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ \dot{z} = g - Cx, \end{cases} \quad (9)$$

где  $g$  – внешнее (задающее) воздействие.

Уравнение состояния объединенной системы будет иметь вид:

$$\dot{x}_o = A_o x_o + B_o u. \quad (10)$$

Вектор состояния дополнен переменной состояния введенного интегратора  $z$ ,

$$x_o = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_{12} \\ \Omega_2 \\ \alpha_2 \\ z \end{bmatrix}, \quad (11)$$

а матрицы состояния, управления и выхода объединенного объекта соответственно будут иметь вид:

$$A_o = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad B_o = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_o = [C \quad 0].$$

Для управления объектом используем закон модального управления:

$$u = -Kx_o. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10), получим систему уравнений замкнутой системы

$$\begin{cases} \dot{x}_o = (A_o - B_o \cdot K) x_o, \\ y = C_o x_o, \end{cases} \quad (13)$$

или

$$\begin{cases} \dot{x}_o = Fx_o, \\ y = C_o x_o, \end{cases} \quad (14)$$

где  $F$  – матрица состояния замкнутой системы, а  $K$  – матрица коэффициентов обратной связи [7].

Матрица  $K$ , должна быть выбрана таким образом, чтобы матрица состояния замкнутой системы имела собственные числа, равные заданным. Это условие будет выполнено, если матрица  $F$  подобна какой-либо эталонной матрице –  $Fe$  с известными, необходимыми собственными числами.

Определитель матрицы  $F$  системы, изображенной на рис. 7, представляет собой полином пятого порядка:

$$p = x^5 + (0,1136k_1 + 4,3939)x^4 + (9,79 \cdot 10^7 k_2 + 1,35 \cdot 10^5)x^3 + (496,475k_1 + 496,475k_3 + 1,92 \cdot 10^4)x^2 + 496,475k_4 x + 496,475k_5. \quad (15)$$

Пусть полиномом с желаемыми собственными числами будет полином фильтра Бесселя пятого порядка с полосой пропускания частот  $\omega_d = 75$  рад/с:

$$p_b = x^5 + 3,81\omega_d x^4 + 6,78\omega_d^2 x^3 + 6,89\omega_d^3 x^2 + 3,94\omega_d^4 x + \omega_d^5. \quad (16)$$

Фильтр Бесселя был выбран, поскольку имеет наиболее плавную переходную характеристику, однако, кроме него в Matlab имеются и другие эталонные фильтры: Баттерворта, Чебышева первого и второго порядка, эллиптический.

Подставляя коэффициенты при соответствующих степенях в уравнениях (15) и (16), получим значения элементов матрицы  $K$ :

$$k_1 = 2,4764 \cdot 10^3, \quad k_2 = -9,8879 \cdot 10^{-4}, \quad k_3 = 3,3366 \cdot 10^3, \quad k_4 = 2,5086 \cdot 10^5, \quad k_5 = -4,7798 \cdot 10^6.$$

Наиболее простой способ вычисления матрицы обратных связей заключается в выполнении следующей команды Matlab

$$K = \text{place}(A, B, p), \quad (17)$$

где  $p$  – полюса эталонного характеристического полинома.

### Синтез алгоритма управления в условиях неполной информации о состоянии объекта

Реализация рассмотренного в предыдущем разделе закона управления требует знания всех координат вектора состояния ОУ, но в действительности измерению доступно только положение первой массы. В подобных случаях возникает проблема вычисления или оценки неизмеряемых координат состояния по показаниям тех датчиков, которые можно установить на объекте.

Одним из вариантов оценивания неизмеряемых координат является использование наблюдателя полной размерности. В работе [8] рассмотрена подобная система. Синтез наблюдателя полной размерности осуществлялся стандартными методами, описанными в [9].

В этом случае эффективность применения наблюдателя в значительной степени связана с точностью идентификации параметров механизма оси и определения момента нагрузки на валу двигателя, то есть момента сухого трения. Наличие момента сухого трения на первой массе приводит к появлению ошибок в оценке наблюдателем скорости второй массы, момента упругой связи и ветрового момента на ней, а замыкание системы по координате наблюдателя приводит к потере устойчивости системы. Следовательно, методы построения наблюдателей полной размерности требуют более глубокого анализа, и применение их на данном этапе недопустимо.

### Синтез алгоритма управления редуцированным объектом

Поскольку положение второй массы недоступно ни измерению, ни оценке, будем синтезировать систему управления на основании показаний датчика положения только первой массы. Рассмотрим АЧХ объекта управления, представленную на рис. 8. Эта характеристика соответствует передаточной функции  $W(s) = \Omega_1(s)/u(s)$ . Это типичная характеристика двухмассового объекта с резонансной частотой  $f_r = 367/(2\pi) = 58,4$  Гц. Используя те же

принципы редукции, что и ранее, будем брать во внимание только низкочастотную область характеристики, она представляет собой АЧХ апериодического звена с коэффициентом усиления  $K_{ob} = 0,026 \text{ В}\cdot\text{рад/с}$  и постоянной времени  $T_{ob} = 8,4 \text{ с}$ .

Таким образом, имея в виду интегрирующее звено, выходом которого является положение первой массы  $\alpha_1$ , порядок системы уменьшается до второго. Структурная схема системы управления редуцированным ОУ представлена на рис. 9.

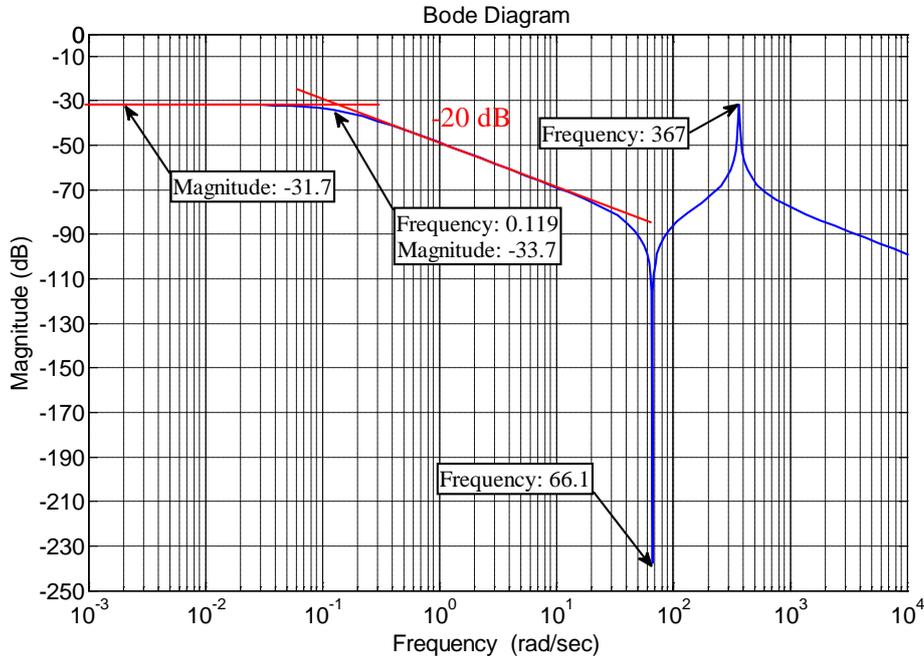


Рис. 8. АЧХ объекта управления

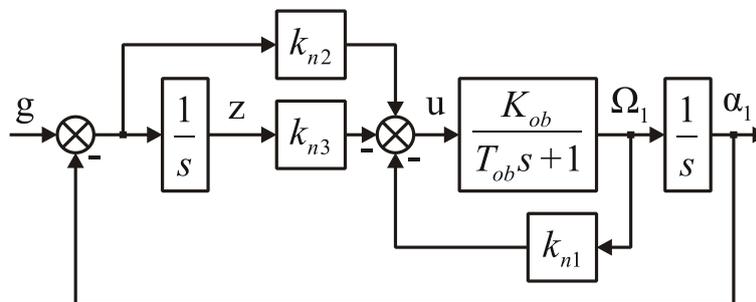


Рис. 9. Структурная схема системы управления редуцированным ОУ

Вектор переменных состояния, матрица состояния и матрица входа такой системы имеют вид:

$$x = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \alpha_1 \\ z \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ob}} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{K_{ob}}{T_{ob}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Синтезируем систему управления редуцированным объектом по принципу, представленному в разделе «Синтез алгоритма управления». Полиномом с желаемыми собственными числами будет полином фильтра Бесселя третьего порядка с полосой пропускания частот  $\omega_d = 75 \text{ рад/с}$ . Коэффициенты обратной связи имеют следующие значения:

$$k_{n1} = 5,656 \cdot 10^4, \quad k_{n2} = 4,303 \cdot 10^6, \quad k_{n3} = -1,308 \cdot 10^8.$$

### Синтез наблюдателя пониженной размерности

Поскольку в ОУ установлен лишь датчик положения первой массы, скорость первой массы вычисляется как производная положения  $\Omega_1 = d\alpha_1/dt$ . При этом следует учесть, что при реализации системы управления на микроконтроллере происходит переход к дискретной системе, и скорость вычисляется следующим образом:

$$\Omega_1(n) = \frac{\alpha_1(n) - \alpha_1(n-1)}{T_d}, \quad (18)$$

где  $\Omega_1(n)$  – скорость первой массы на текущем шаге дискретизации,  $\alpha_1(n)$  и  $\alpha_1(n-1)$  – положение первой массы на текущем и на предыдущем шагах дискретизации соответственно, а  $T_d$  – период дискретизации.

Допустим, у датчика положения максимальная абсолютная погрешность измерения обусловлена только квантованием по уровню:

$$\Delta\alpha_1 = \pm \frac{360}{2N} = \pm \frac{Q}{2} \text{ угл. град}, \quad (19)$$

где  $N$  – разрешающая способность датчика;  $Q$  – шаг квантования датчика.

В случае, когда

$$\Delta\alpha_1(n) = +\frac{Q}{2} \text{ угл. град}, \quad \Delta\alpha_1(n-1) = -\frac{Q}{2} \text{ угл. град},$$

максимальная абсолютная погрешность измерения скорости

$$\Delta\Omega_1 = \pm \frac{Q}{T_d} \text{ угл. град /с}. \quad (20)$$

При разрешающей способности датчика положения  $N = 80 \cdot 10^6$  и периоде дискретизации  $T_d = 1$  мс.

$$\Delta\Omega_1 = \pm 16,2 \text{ угл. сек /с}.$$

Для уменьшения ошибки вычисления скорости будем использовать наблюдатель пониженной размерности.

Преобразуем закон управления (12) следующим образом

$$-Kx = N_1 y + N_2 \tilde{w}, \quad (21)$$

где  $y = Cx$  – вектор измеряемых переменных состояния,  $\tilde{w} = Tx$  – вектор оцениваемых переменных состояния, матрица  $T$  пока неизвестна.

Уравнение (21) справедливо при любых  $x$  если

$$-K = N_1 C + N_2 T = [N_1 \quad N_2] \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим

$$[N_1 \quad N_2] = -K \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}^{-1}.$$

Следовательно, выполнение закона (21) может быть выполнено после определения матрицы  $T$ .

Уравнение состояния наблюдателя пониженной размерности имеет следующий вид:

$$\dot{\tilde{w}} = A_n \tilde{w} + B_n u + R_n y, \quad (23)$$

где  $B_n = TB$  – матрица входа наблюдателя по управлению.

Матрица состояния наблюдателя  $A_n$  должна быть гурвицева, порядок матрицы соответствует числу наблюдаемых переменных. Матрица входа наблюдателя по измеряемым переменным  $R_n$  выбирается из условия управляемости наблюдателя.

Матрица  $T$  находится в результате решения уравнения Сильвестра [9].

$$TA - A_n T = RC.$$



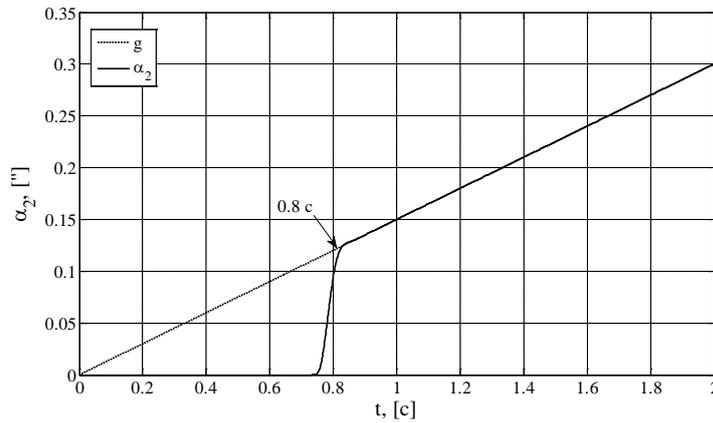


Рис. 12. Результаты моделирования системы управления электропривода с двухмассовой исполнительной осью при наличии момента сухого трения

На рис. 13 представлены результаты моделирования точно такой же системы, но при наличии момента сухого трения на первой массе и ветрового момента нагрузки на второй.

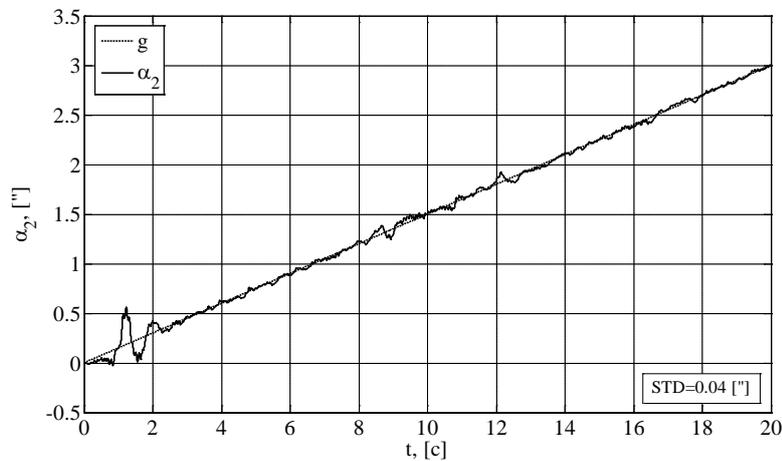


Рис. 13. Результаты моделирования системы управления электропривода с двухмассовой исполнительной осью при наличии момента сухого трения и ветровой нагрузки

Из результатов моделирования видно, что при наличии ветровой нагрузки на второй массе, положение ее находится в некоторой окрестности сигнала задания. Значение среднеквадратической ошибки составляет  $STD = 0,04$  угл. сек.

Для проверки чувствительности системы к отклонению параметров было проведено моделирование системы при рассчитанном ранее управлении со следующими параметрами объекта  $J_1 = 0,85 \cdot J_1$ ,  $J_2 = 1,15 \cdot J_2$ ,  $k_s = 0,85 \cdot k_s$ . То есть, рассмотрен наихудший вариант, когда коэффициент жесткости уменьшился на 15 %, а коэффициент соотношения масс увеличился на 34 %. Результат моделирования практически не отличается от представленного на рис. 13. Значение  $STD$  составило  $0,05$  угл. сек.

Далее была промоделирована система с датчиком положения и наблюдателем скорости первой массы. Структурная схема системы в интерактивной среде Matlab/Simulink представлена на рис. 14.

На рис. 15 представлены результаты моделирования такой системы при подаче на вход линейно возрастающего воздействия, но уже со скоростью  $0,4$  угл. сек /с и наличием момента сухого трения на первой массе.

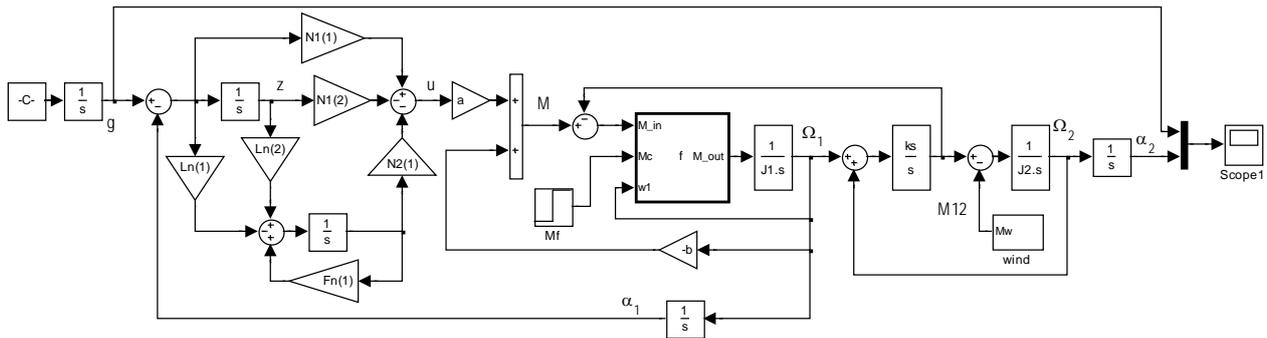


Рис. 14. Структурная схема системы управления электропривода с двухмассовой нагрузкой и наблюдателем скорости первой массы

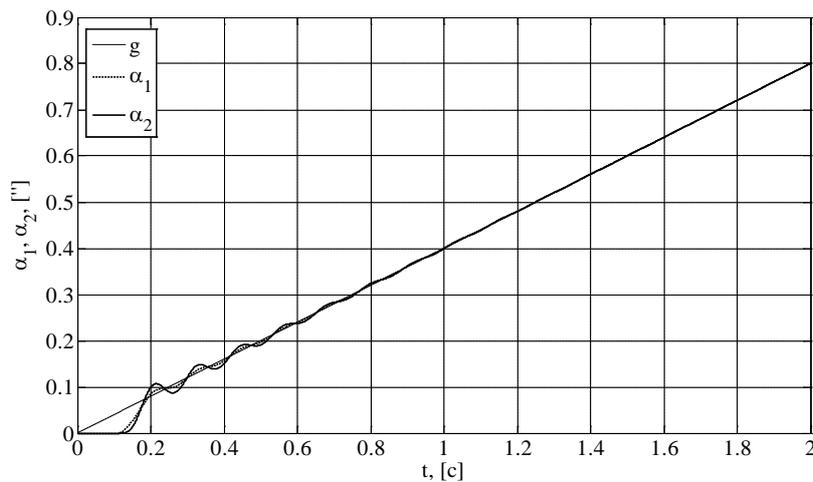


Рис. 15. Результаты моделирования системы управления электропривода с двухмассовой исполнительной осью и наблюдателем скорости первой массы при наличии момента сухого трения

Из результатов моделирования следует, что через 0,8 с система входит в установившийся режим и продолжает движение со скоростью 0,4 угл. сек/с. Для системы замкнутой по положению первой массы нижняя граница диапазона скоростей плавного слежения составляет 0,4 угл. сек/с, что несколько выше чем в системе с подчиненным регулированием. Среднеквадратическая ошибка в установившемся режиме как и в предыдущей системе отсутствует.

На рис. 16 представлены результаты моделирования точно такой же системы, но при наличии момента сухого трения на первой массе и ветрового момента нагрузки на второй.

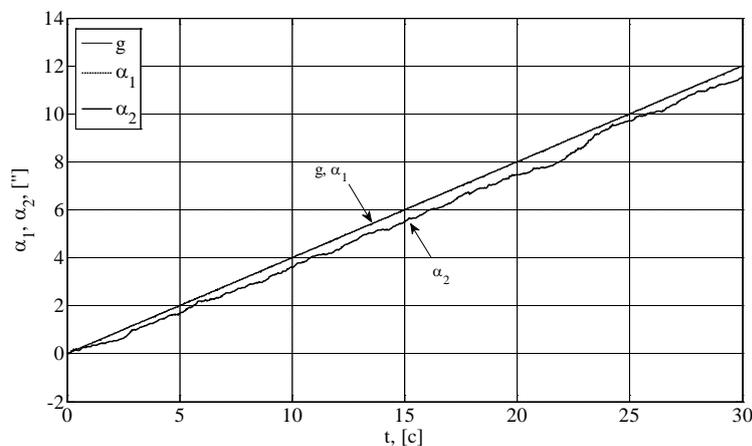


Рис. 16. Результаты моделирования системы управления электропривода с двухмассовой исполнительной осью и наблюдателем скорости первой массы при наличии момента сухого трения и ветровой нагрузки

Как видно из рисунка при наличии ветровой нагрузки на второй массе, ее положение, как и в случае с предыдущей системой, находится в некоторой окрестности сигнала задания. При этом значение среднеквадратической ошибки составляет уже  $STD = 0,39$  угл. сек. Это практически в 10 раз больше, чем в системе замкнутой по положению второй массы, однако в данном случае, значение  $STD$  все еще находится в рамках технического задания.

### Основные достигнутые результаты

1. Получена и проанализирована математическая модель прецизионного электропривода с двухмассовой исполнительной осью.
2. Синтезирована система управления по принципу грубого управления вынужденным движением.
3. Использование синтезированной системы управления позволило в 2,5 раза снизить нижнюю границу скоростей плавного слежения по отношению к подчиненной системе управления, а также уменьшить среднеквадратическую ошибку в типовых режимах слежения.
4. Синтезирован наблюдатель пониженной размерности. В составе системы управления редуцированным объектом наблюдатель производит оценку скорости первой массы.

### Области возможного использования

Теоретическая значимость проекта состоит в развитии алгоритмов управления прецизионного электропривода с упругими связями.

Разработка нового раздела дисциплины «Системы управления электроприводов оптико-механических комплексов» для студентов шестых курсов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Практическая значимость проекта состоит в использовании результатов при разработке и изготовлении электроприводов систем наведения телескопов траекторных измерений.

### Публикации

1. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Синтез алгоритма управления прецизионного следящего электропривода // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. Иваново, 2012. С. 208–212.
2. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Анализ робастности неадаптивной системы управления электропривода с вариациями структуры и параметров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 40–44.
3. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Управление объектом с упругими связями // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2012. № 2. Сер. 1: Естественные и технические науки. С. 36–39.
4. Абдуллин А.А., Толмачев В.А. Система регулирования скорости двухмассового механизма с использованием наблюдателя // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 5. С. 66–71.

### Литература

1. Абдуллин А.А., Толмачев В.А. Система управления следящего электропривода с нежесткой исполнительной осью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 77. № 1. С. 41–46.
2. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Синтез алгоритма управления прецизионного следящего электропривода // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. Иваново, 2012. С. 208–212.
3. Толмачев В.А., Антипова И.В., Фомин С.Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. Вып. 10 (44). С. 142–146.
4. Толмачев В.А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 3. С. 68–72.

5. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Анализ робастности неадаптивной системы управления электропривода с вариациями структуры и параметров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 40–44.
6. Дроздов В.Н., Мирошник И.В., Скорубский В.И. Система автоматического управления с микроЭВМ. Л., 1989. – 284 с.
7. Григорьев В.В., Дроздов В.Н., Лаврентьев В.В., Ушаков А.В. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ. Л., 1983. – 357 с.
8. Абдуллин А.А., Толмачев В.А. Система регулирования скорости двухмассового механизма с использованием наблюдателя // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 5. С. 66–71.
9. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М., 1976. – 184 с.



**Алехин Артем Андреевич**

**Факультет оптико-информационных систем и технологий**

**Кафедра оптико-электронных приборов и систем**

**E-mail: alekhin.a.a@mail.ru**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**А.А. Алехин**

**Научный руководитель – доцент А.Н. Чертов**

### **Введение**

Мировой спрос на драгоценные металлы и камни стабилен при неуклонном снижении качества добываемых и перерабатываемых руд. Это обуславливает актуальность внедрения новых, более эффективных методов обогащения, а также совершенствования уже используемых. Оптический метод (в зарубежной практике известен как «color sorting»), основанный на анализе цветовых характеристик объектов в реальном времени, является в настоящее время одним из наиболее перспективных [1–3].

На рынке обогатительного оборудования широко представлены оптические сепараторы различных фирм, например: ALIUD GmbH (сепараторы Optosort), Mogensen GmbH (сепараторы MikroSort), Commodas GmbH (сепараторы UltraSort) и др. Стоимость подобных сортировочных комплексов составляет порядка 5–10 млн руб.

Одним из наиболее существенных препятствий развития метода является отсутствие методики предварительной оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом, поскольку отсутствует инструмент анализа его эффективности – за исключением существующих оптических сепараторов. При этом результаты сортировки, полученные с использованием того или иного типа сепаратора (при том еще и разных производителей), характеризуют не оптический метод в целом, а конкретный сепаратор. Другими словами, на данный момент невозможно оценить ни потенциальную возможность обогащения того или иного типа руды оптическим методом, ни эффективность использования конкретной модели оптического сепаратора без прямого опробования (то есть без транспортирования рудной пробы к сепаратору или сепаратора к месторождению).

Кроме того, в настоящее время оптический метод сепарации подразумевает анализ исключительно цветовых параметров минеральных объектов. При этом игнорируются другие селективные признаки, такой как, например, степень прозрачности, использование которого позволило бы значительно расширить возможности метода.

Прямым следствием сложившейся ситуации является отсутствие развития метода и отторжение потенциальных заказчиков, поэтому разработка портативного оптико-электронного аналитического комплекса для решения указанных проблем весьма актуальна.

### Цели и задачи работы

Целью данной работы является исследование и разработка принципов построения оптико-электронной системы технологической оценки минеральных объектов (ОЭС-М) для нужд отечественной горнодобывающей промышленности.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить аналитический обзор принципов и схем построения аналитической части существующих радиометрических, в том числе, оптических сепараторов.
2. Разработать схему построения ОЭС-М.
3. Разработать несколько вариантов конструкции исследовательского макета ОЭС-М для различных типов руд и снабдить его базовым программным обеспечением (ПО).
4. Провести экспериментальные исследования разработанных макетов и ПО с использованием различных рудных проб.

### Методы исследования

В работе применяются:

- элементы теории оптических приборов [4];
- методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах (в частности: адаптация углового поля оптико-электронного прибора и адаптация чувствительности в оптико-электронных приборах) [5];
- методы инструментального измерения цвета для определения цветопередачи цифровых камер [6];
- методы измерения точности определения цвета [7].

### Основные достигнутые результаты

#### **Разработка схемы функционирования ОЭС-М**

Проведенный аналитический обзор существующих оптических сепараторов показал, что их система регистрации, как правило, содержит несколько фотоприемных узлов (не менее двух). Исключение составляют относительно простые системы инспекции и проверки нахождения объекта в зоне анализа – в них зачастую содержится одно фотоприемное устройство. На основе результатов проведенных теоретических исследований была предложена схема построения ОЭС-М, представленная на рис. 1.

В ней используются два канала регистрации (КР1 и КР2). Симметрично относительно оптической оси каждого КР расположены источники освещения (ИО), питающиеся от блока питания источников освещения (БП ИО). Оба канала регистрации КР1 и КР2 – цифровые телевизионные камеры (далее – камеры) с механизмом изменения дистанции до объекта анализа.

В основу разработки схемы функционирования ОЭС-М было заложено два способа доставки образца в зону анализа. В первом варианте образец пробрасывается через транспортный канал (динамический вариант построения ОЭС-М и автоматический режим работы). Во втором – объект устанавливается в зону анализа оператором (статический вариант построения и ручной режим работы).

В динамическом режиме возникает необходимость синхронизации момента входа образца в зону анализа (ЗА) с моментом съемки. Предпочтительнее это реализовывать с помощью целевого датчика (ЩД), который регистрирует проброс. Он подает сигнал либо на буферный контроллер, который запускает съемку камеры, и она сохраняет кадр или их серию, либо в ПК с программным обеспечением LabView, который сохраняет необходимую серию кадров (реализация зависит от конкретного оборудования). Данный вариант необходим в ситуации,

когда требуется сортировка нескольких образцов последовательно в реальном масштабе времени (например, случай конвейерной ленты).

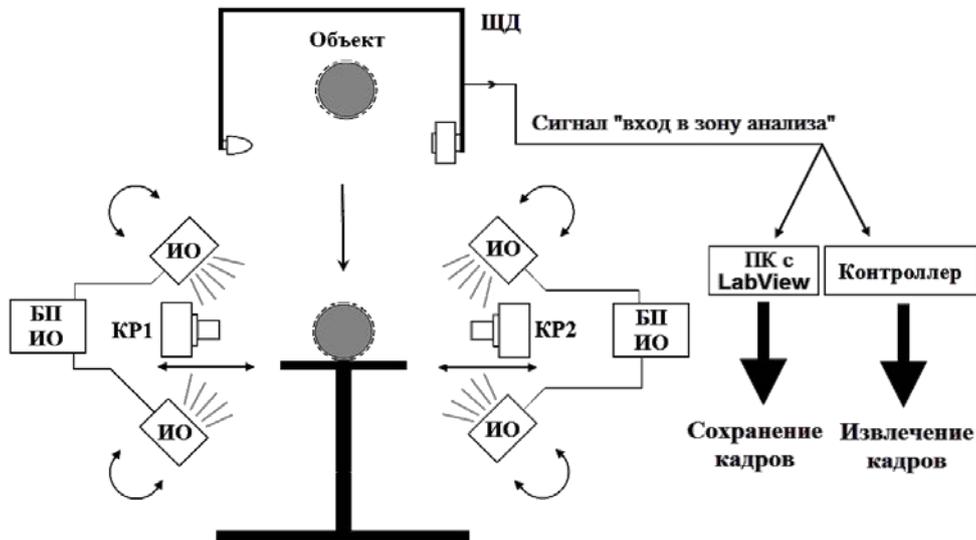


Рис. 1. Общая схема построения ОЭС-М

Статический вариант предназначен для углубленного исследования минерального образца, его условий наблюдения и влияния их на полученное изображение, а также для отработки и отладки алгоритмов цветового анализа. Этот вариант позволяет упростить схему и исключить элементы, необходимые для запуска камеры (ЩД, буферный контроллер и пр.).

Для экспериментального исследования разработанной схемы ОЭС-М было предложено несколько макетов, предназначенных для исследования различных типов руд. В их основу положен статический вариант схемы работы ОЭС-М.

### Базовый исследовательский макет для углубленного анализа твердых непрозрачных минеральных образцов

Общий вид исследовательского макета представлен на рис. 2. Это вариант реализации фотоприемного узла исследовательского комплекса, который предназначен для экспериментального исследования особенностей непрозрачных минералов и отработки алгоритмов цветового анализа. Размерная группа анализируемых минеральных образцов – любая, ограничения связаны только с параметрами оптической системы, дистанцией до зоны анализа и разрешающей способностью камеры. Параметры регистрирующей системы: расстояние до зоны анализа – 20 см, фокусное расстояние CS-объектива – 8 мм, камера на основе КМОП-матрицы с разрешением 1280×960 пикселей. В данном исследовании использовалась размерная группа образцов 10–100 мм.

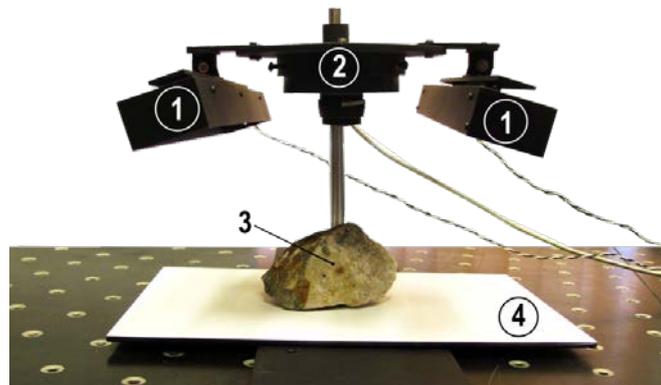


Рис. 2. Базовый исследовательский макет: 1 – источники освещения рабочей зоны; 2 – цифровая видеочка; 3 – исследуемый объект (минеральный образец); 4 – фон (в виде белой или черной пластинки)

В данном макете применяются линейные светодиодные источники освещения Avago Technologies ADJD-хМ40 (12 светодиодов дневного свечения в каждой из двух линеек), помещенные в специально оформленный корпус, отводящий от них тепло. Фотоприемным устройством является цифровая камера ЭВС VEI-545, помещенная в специально разработанный корпус, который позволяет с легкостью монтировать ее на любых кронштейнах.

На данном исследовательском стенде проведены экспериментальные исследования различных образцов золотосодержащей руды. На рис. 3, 4 и 5 представлены изображения образцов на черном фоне, полученные в системах RGB, YUV, HLS, соответственно, а также после обработки алгоритмом выделения оттенков.

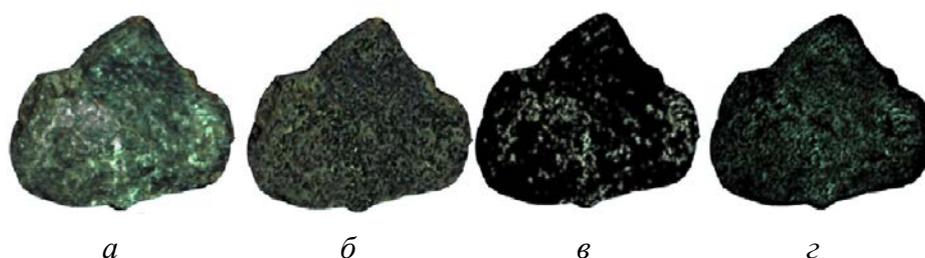


Рис. 3. Изображения в RGB-системе: а – исходное; б, в и г – обработанные при выделении: серых, желтых и зеленых оттенков, соответственно

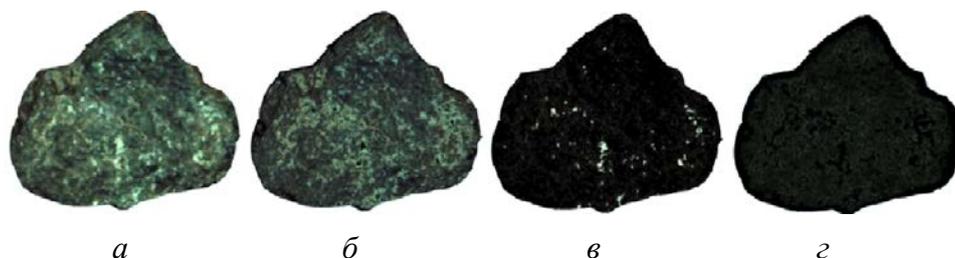


Рис. 4. Изображения в YUV-системе: а – исходное; б, в и г – обработанные при выделении: серых, желтых и зеленых оттенков, соответственно

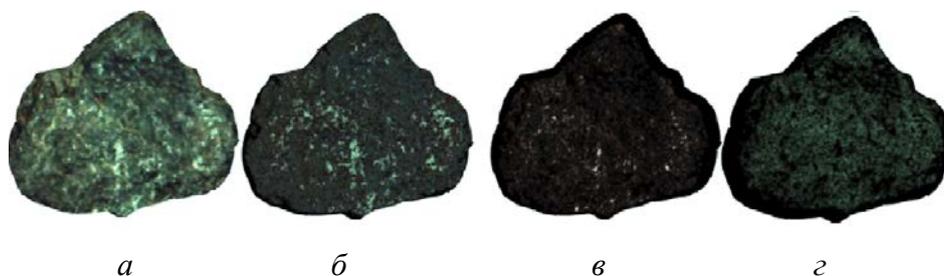


Рис. 5. Изображения в HLS-системе: а – исходное; б, в и г – обработанные при выделении: серых, желтых и зеленых оттенков, соответственно

Съемка производилась на фоне черной пластинки во избежание появления блика от источников освещения – этим обуславливается темный фон в обработанных изображениях (все пиксели, кроме выделяемого диапазона оттенков, имеют черный цвет).

Как показали экспериментальные исследования, изображения, полученные в каждом из цветовых пространств (RGB, YUV, HLS), обрабатываются алгоритмом цветового анализа по-разному [8]. Например, при использовании системы RGB желтых пикселей в образце выделяется больше, чем в остальных цветовых моделях. При использовании системы YUV больше выделяется серых пикселей. В настоящее время оператор с помощью базового ПО может настроить условия получения изображения (экспозиция, усиление, разрешение), выбрать тип цветового пространства при сохранении изображения. ПО постепенно наращивает свой функционал. В перспективе оно призвано автоматически выполнять углубленный анализ минеральных объектов выбранной размерной группы.

### Исследовательский макет для углубленного анализа твердых минеральных образцов малой степени прозрачности

В макете, представленном на рис. 6, используются линейные светодиодные источники освещения Avago Technologies ADJD-хM40 в специальном корпусе и цифровая камера ЭВС VEI-545. Для установки объекта используется моторизованный угловой транслятор (прецизионная угловая подвижка 8MR190-2-4247 фирмы «Standa»), который позволяет обеспечить поворот объекта относительно узла регистрации. Это помогает настроиться на оптимальный ракурс съемки. Подвижка управляется с помощью специализированного ПО и обеспечивает угол вращения 360° с эксцентриситетом в 10 мкм, что позволяет обеспечить высокую точность позиционирования.

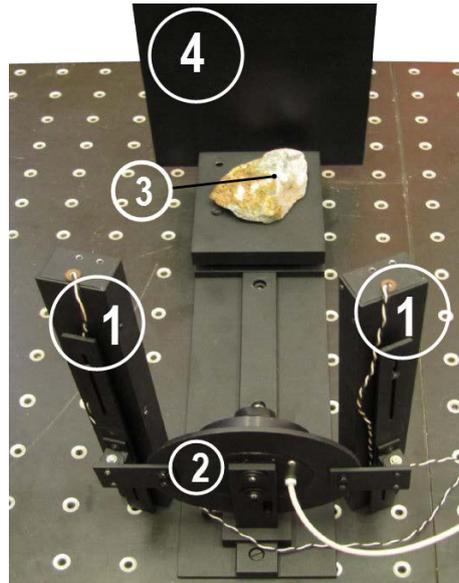


Рис. 6. Исследовательский макет ОЭС-М для исследования минеральных объектов малой степени прозрачности: 1 – подсветка рабочей зоны; 2 – цифровая камера; 3 – исследуемый объект (минеральный образец); 4 – фон в виде черной пластинки

В представленном исследовательском макете помимо цвета предполагается использовать и другие селективные признаки, например, наличие включений малой прозрачности или анализ слабопрозрачного образца в целом. Предварительные теоретические исследования говорят о целесообразности использования этих селективных факторов в качестве информационных при сортировке минерального сырья.

### Исследовательский макет для углубленного анализа твердых минеральных образцов высокой степени прозрачности

Разработанный исследовательский макет представлен на рис. 7. В правом верхнем углу рисунка приведен участок увеличенного изображения интегрированной внутрь угловой подвижки подсветки (на основе SMD-светодиодов дневного свечения). Она освещает опорную часть минерала через прозрачную подставку из оргстекла. В данном макете также используется цифровая камера ЭВС VEI-545. Она устанавливается на оптическую скамью с помощью специального кронштейна.

Для установки объекта используется моторизованный угловой транслятор – прецизионная угловая подвижка 8MR190-2-4247 фирмы «Standa», который управляется с помощью специализированного ПО и позволяет подобрать наиболее оптимальный ракурс для съемки. Использование четырех специально разработанных источников освещения на основе 66-ти SMD-светодиодов белого свечения при окружном расположении обеспечивает более равномерную подсветку зоны анализа. Дизайн их корпуса позволяет оптимально рассеивать выделяющееся тепло.

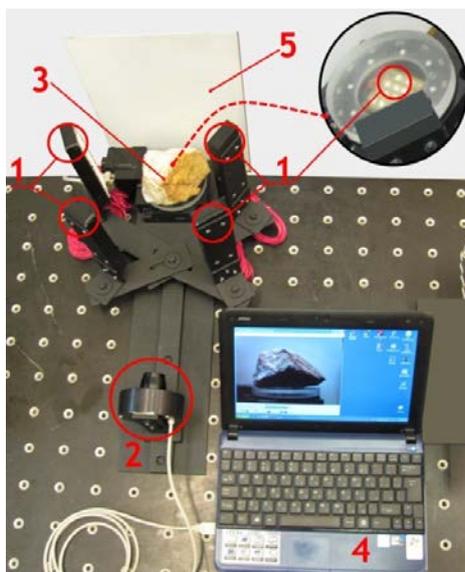


Рис. 7. Исследовательский макет для углубленного анализа твердых минеральных образцов высокой степени прозрачности: 1 – источники освещения; 2 – цифровая камера; 3 – образец в зоне анализа; 4 – компьютер; 5 – фон в виде светлой или темной пластинки (в данном случае показана светлая)

ПО позволяет вручную производить съемку, настраивать параметры изображения (экспозицию, контраст, усиление, насыщенность и т. д.), кадрировку и в настоящее время является базовым. В дальнейшем оно будет интегрироваться в единую модульную программную оболочку и наращивать функционал.

Данный стенд – это реализация одного канала регистрации системы, представленной на рис. 1. После отработки технических решений и разработки автоматических алгоритмов цветовыделения планируется реализовать второй симметричный и идентичный первому канал регистрации и провести экспериментальные исследования с различными видами проб.

После отработки технических решений и разработки автоматических алгоритмов цветовыделения планируется реализовать дополнительную симметричную часть стенда – второй канал регистрации – и провести экспериментальные исследования с различными видами проб.

Экспериментальное исследование цветопередачи камеры при автоматически подобранных настройках

В ходе исследований было проанализировано качество цветопередачи цифровой камеры с целью определения возможности применения автоматических настроек программы-драйвера. С помощью цветовой колориметрической таблицы Munsel ColorChecker на 24 оттенка (рис. 8) был проведен ряд съемочных тестов.

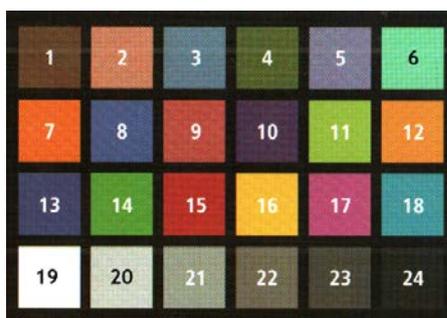


Рис. 8. Изображение цветовой колориметрической таблицы Munsel ColorChecker

Полученные снимки были обработаны специальным ПО, разработанным в среде Matlab. Разложение изображения на красный, зеленый и синий каналы цветности и сравнение

экспериментально измеренных цветовых координат в изображении с эталонными выявило их несовпадение. На основе этого принято решение о непригодности использования автоматических настроек. Поэтому была разработана методика цветовой настройки (последовательность действий по регулировке яркости, усиления, экспозиции, цветового баланса камеры и пр.) [9]. Эталонные поверочные цветовые координаты колориметрической таблицы указаны в документации (рис. 9). Примеры изображений самой колориметрической таблицы и образцов руд до и после цветокоррекции приведены на рис. 10 и 11. При составлении алгоритмов цветового анализа необходимо использовать подобные методы цветокоррекции, поскольку для различных цифровых камер цветопередача различна.

No.	Number	sRGB			CIE L*a*b*			Munsell Notation	
		R	G	B	L*	a*	b*	Hue Value / Chroma	
1.	dark skin	115	82	68	37.986	13.555	14.059	-3 YR	3.7 / 3.2
2.	light skin	194	150	130	65.711	18.13	17.81	2.2 YR	6.47 / 4.1
3.	blue sky	98	122	157	49.927	-4.88	-21.925	4.3 PB	4.95 / 5.5
4.	foliage	87	108	67	43.139	-13.095	21.905	6.7 GY	4.2 / 4.1
5.	blue flower	133	128	177	55.112	8.844	-25.399	9.7 PB	5.47 / 6.7
6.	bluish green	103	189	170	70.719	-33.397	-0.199	2.5 BG	7 / 6
7.	orange	214	126	44	62.661	36.067	57.096	5 YR	6 / 11
8.	purplish blue	80	91	166	40.02	10.41	-45.964	7.5 PB	4 / 10.7
9.	moderate red	193	90	99	51.124	48.239	16.248	2.5 R	5 / 10
10.	purple	94	60	108	30.325	22.976	-21.587	5 P	3 / 7
11.	yellow green	157	188	64	72.532	-23.709	57.255	5 GY	7.1 / 9.1
12.	orange yellow	224	163	46	71.941	19.363	67.857	10 YR	7 / 10.5
13.	blue	56	61	150	28.778	14.179	-50.297	7.5 PB	2.9 / 12.7
14.	green	70	148	73	55.261	-38.342	31.37	0.25 G	5.4 / 8.65
15.	red	175	54	60	42.101	53.378	28.19	5 R	4 / 12
16.	yellow	231	199	31	81.733	4.039	79.819	5 Y	8 / 11.1
17.	magenta	187	86	149	51.935	49.986	-14.574	2.5 RP	5 / 12
18.	cyan	8	133	161	51.038	-28.631	-28.638	5 B	5 / 8
19.	white (.05*)	243	243	242	96.539	-0.425	1.186	N	9.5 /
20.	neutral 8 (.23*)	200	200	200	81.257	-0.638	-0.335	N	8 /
21.	neutral 6.5 (.44*)	160	160	160	66.766	-0.734	-0.504	N	6.5 /
22.	neutral 5 (.70*)	122	122	121	50.867	-0.153	-0.27	N	5 /
23.	neutral 3.5 (1.05*)	85	85	85	35.656	-0.421	-1.231	N	3.5 /
24.	black (1.50*)	52	52	52	20.461	-0.079	-0.973	N	2 /

Cie L\*a\*b\* values use Illuminant D50 2 degree observer sRGB values for Illuminate D65.

Рис. 9. Эталонные цветовые координаты колориметрической таблицы Munsel ColorCheker

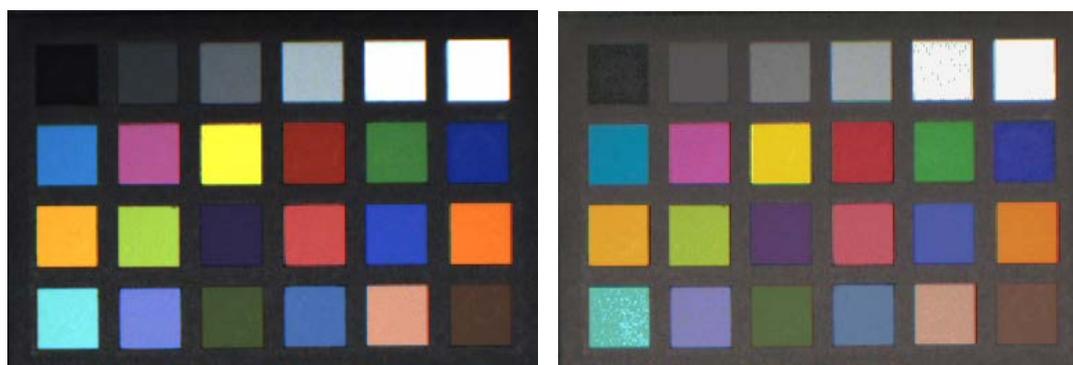


Рис. 10. Изображение таблицы Munsel ColorCheker: слева – до цветокоррекции; справа – после

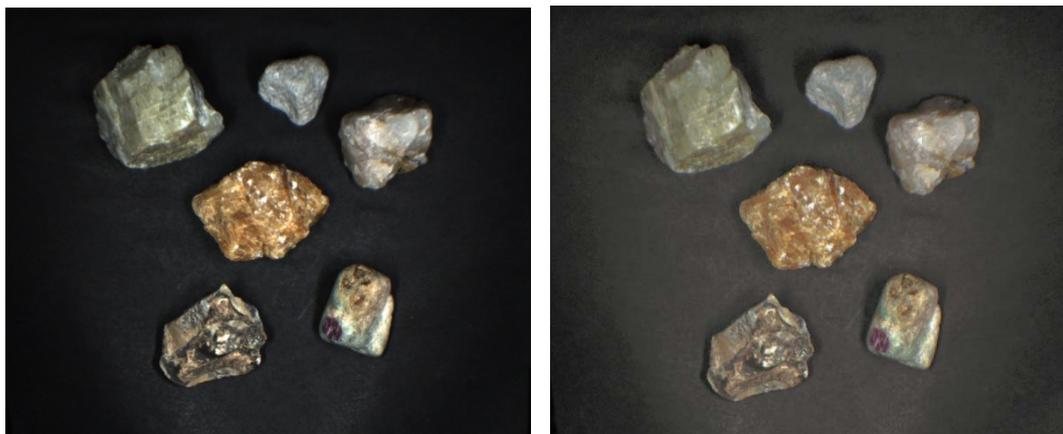


Рис. 11. Изображение минеральных образцов:  
слева – до цветокоррекции; справа – после

### Области возможного использования разрабатываемой системы

Основная область применения – автоматизированные аналитические опико-электронные приборы и комплексы промышленного назначения для:

– горнодобывающей промышленности: на горно-обогатительных предприятиях страны на стадии настройки уже существующих опических сепараторов при добыче золота, алмазов, изумрудов и многих других полезных ископаемых, а также в технологических лабораториях при геологических партиях на стадии оценки обогатимости руд опическим методом;

– перерабатывающей промышленности: сортировка стеклобоя, твердых бытовых отходов;

– пищевой и фармацевтической отраслей промышленности – контроль качества продукции.

### Заключение

В ходе данной работы предложена схема функционирования ОЭС-М. Разработаны исследовательские макеты, необходимые для отработки и отладки алгоритмов цветового анализа опическим методом. Проведены некоторые экспериментальные исследования на образцах рудных проб, которые позволяют выявить особенности получения изображений конкретного типа руды при определенных условиях наблюдения. Понимание этих особенностей призвано облегчить составление интеллектуальных алгоритмов цветового анализа для проведения автоматизированной технологической оценки минеральных объектов.

Также проведено исследование цветопередачи камеры при автоматических настройках программы-драйвера, результаты которого подтверждают необходимость внедрения методов цветокоррекции на этапе захвата изображения камерой (или на стадии обработки изображения). Исследовательские макеты снабжены базовым ПО, которое позволяет производить съемку различных типов руд, настраивать параметры отображения сцены, а также передавать изображение для первичной обработки. В дальнейшем планируется модернизация функционала ПО и интегрирование его в единую модульную программную оболочку в среде LabVIEW.

### Публикации

1. Alekhin A.A., Gorbunova E.V., Chertov A.N., Petuhova D.B. Optical-electronic system for express analysis of mineral raw materials dressability by color sorting method // SPIE Proceedings. Videometrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection, 87911N (May 24, 2013). Poster Session for Automated Visual Inspection. Munich, 2013. Vol. 8791. DOI 10.1117 / 12.2020460.

2. *Алехин А.А.* Оптико-электронный комплекс для экспресс-анализа обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Вып. 3 (85). С. 159–160.

### Литература

1. *Dehler M.* Optical Sorting of Ceramic Raw Materials // Tiles and Bricks International. 2003. Vol. 19. No 4. P. 248–251.
2. *Reinhardt C.* The Use of a Mogensen Sizer and MikroSort Optoelectronic System in Aluminium Production // *Aufbereitungs-Technik / Mineral Processing*. 2002. Vol. 43. No 7. P. 11-16.
3. Murre Technik. Optical Sorting (2012): [www.murre.nl](http://www.murre.nl).
4. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. Л., 1966. – 565 с.
5. *Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П.* Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М., 1981. – 180 с.
6. *Домасев М.В., Гнатюк С.П.* Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб., 2009. – 224 с.
7. *Агостон Ж.* Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне / Пер. с англ. М., 1989. – 184 с.
8. *Alekhin A.A., Gorbunova E.V., Chertov A.N., Petuhova D.B.* Optical-electronic system for express analysis of mineral raw materials dressability by color sorting method // SPIE Proceedings. Videometrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection, 87911N (May 24, 2013). Poster Session for Automated Visual Inspection. Munich, 2013. Vol. 8791. DOI 10.1117 / 12.2020460.
9. *Алехин А.А., Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Чертов А.Н.* Основные принципы настройки цветowych оптико-электронных систем технического зрения промышленного назначения // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 33–36.



**Белых Андрей Вячеславович**  
Факультет гуманитарный  
Кафедра экономической теории и бизнеса  
E-mail: [Andrey-Belykh@mail.ru](mailto:Andrey-Belykh@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ЯКОРЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИНФЛЯЦИИ

А.В. Белых

Научный руководитель – профессор С.Б. Смирнов

### Введение

Целью исследования является проверка гипотез влияния эффекта якоря при прогнозировании инфляции, а также наличия и силы влияния характеристик личности на формирование прогнозов.

Формулировка гипотез:

1. Существует взаимосвязь между формой представления информации и результатом прогноза инфляции.
2. Существует взаимосвязь между психотипом личности и результатом принятия прогностического решения.

Впервые предположение о том, что рациональность экономических агентов имеет ограничения, высказал Герберт Саймон. Он указывал на то, что индивид движим стремлением

не к максимизации полезности, а к получению некоторого удовлетворительного результата. Канеманом и Тверски был проведен ряд исследований «систематических отклонений от модели рациональных агентов», итогом которых явилось составление карт ограниченной рациональности.

«Люди полагаются на ограниченное количество эвристических принципов, которые сводят сложные задачи по оценке вероятностей прогнозируемой ценности к более простым операциям суждения. В общем, эти эвристики довольно полезны, но иногда они приводят к серьезным и систематическим ошибкам» [1]. В статье были представлены три эвристики – репрезентативность, пригодность и эффект якоря (anchoring effect). Эти эвристики использовались для объяснения целого ряда систематических отклонений в суждениях в ситуации неопределенности, включая нерегрессивный прогноз, игнорирование базовой информации, самоуверенность, переоценку частоты возникновения наиболее легко припоминаемых событий и др. Эффект якоря проявляется в смещении числовых оценок в сторону ранее доступной числовой информации.

Канеман и Фредерик позднее пересмотрели ранние результаты изучения эвристик суждения и предложили формулировку, в которой сведение сложных задач к простым операциям достигается замещением атрибутов: «Принято считать, что суждение опосредуется эвристикой, когда индивид оценивает определенный целевой атрибут объекта путем подстановки (замещения) свойства этого объекта эвристическим атрибутом, который легче приходит на ум» [2]. В отличие от ранних работ, эта концепция не ограничена областью суждений в условиях неопределенности.

Дэн Ариэли в 2008 г. опубликовал отчеты по экспериментам, которые он и его коллеги провели для демонстрации силы внушения в формировании «якорей» для цен на товары и услуги. Ариэли показывает, как легко люди поддаются манипулированию в модели «произвольной последовательности». «Как только мы получим цену – якорь, он будет определять не только, как мы видим цену в настоящее время, но и цены в будущем» [3].

В связи с изложенным выше интерес представляет изучение влияния эффекта якоря на оценки значений макроэкономических показателей. Также требует отдельного изучения вопрос возможного влияния структуры личности на принятие прогностических решений. Психотип личности является врожденной психической структурой, определяющей конкретный вид информационного обмена личности со средой и, предположительно, должен оказывать влияние на результат прогностического решения, принимаемого индивидом.

Для целей исследования в работе применена типология психотипов, определяемая тестом Моудсли «Методика самооценки тревожности, ригидности и экстраверсии» [4]. Данная методика выбрана в связи со сравнительной простотой реализации и понятной интерпретацией ожидаемых результатов.

Достижение указанных целей предполагает решение следующих задач:

- проведение эксперимента;
- верификация и обработка полученных данных;
- статистический анализ данных и проверка поставленных гипотез.

Методология проведения исследования включает анкетирование в трех группах респондентов с изменением влияющего параметра для каждой из групп. Описание эксперимента:

- респондентам объявляется о том, что они примут участие в двух исследованиях;
- каждая из трех групп респондентов, изъявивших желание принять участие в эксперименте, размещается в отдельной аудитории;
- участникам эксперимента выдаются анкеты содержащие тест Моудсли;
- после заполнения анкет объявляется о начале второго эксперимента. С применением технических средств респондентам демонстрируются данные по уровню инфляции в различных макрорегионах и отдельных странах;
- в зависимости от группы доступной остается информация о макрорегионе с относительно высоким, средним и низким уровнями инфляции, после чего от респондентов требуется сделать прогноз уровня инфляции в России на следующий год.

Для получения статистически значимых результатов численность каждой группы должна составлять не менее 35 человек. Данные, полученные в ходе эксперимента, были обработаны с помощью статистических пакетов Gretl, PSPP. Для проверки первой гипотезы (влияние эффекта якоря на оценки значений макроэкономических показателей) достаточно определить статистическую значимость различий между средними значениями оценок уровня инфляции каждой группы.

Вторая гипотеза более детализирована. Для ее проверки требуется применение корреляционного и регрессионного анализов. Ожидается, что для респондентов с более высокой тревожностью, склонных воспринимать высокую инфляцию как возможную угрозу своему благосостоянию, будут характерны сравнительно высокие значения прогнозируемого уровня инфляции в России. Для респондентов с более низкой ригидностью, склонных сравнительно легко пересматривать свои суждения, можно ожидать более сильного проявления эффекта якоря. Респонденты с высокими оценками по шкале экстраверсии, в большей степени ориентированные на получение информации из внешней среды, а не на собственные суждения, также могут показать более сильную зависимость от порядка предоставления информации.

Результатом исследования является подтверждение или опровержение выдвинутых гипотез.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего уточнения модели экономического поведения. Исследование углубляет знания о структуре и логике принятия прогностических решений, а полученные результаты расширяют и конкретизируют состав и структуру методологического обеспечения поведенческой экономики. Они также могут использоваться как одно из оснований комплексных исследований взаимосвязи психотипа личности и проявления эвристик.

Практическая значимость результатов исследования связана с расширением проблематики методологических работ в когнитивистике применительно к поведению экономических агентов. Полученные результаты дадут научным работникам (аспирантам, соискателям) методологические ориентиры, создающие возможность корректного применения психологических знаний в области поведенческой экономики. Результаты также могут быть использованы для подготовки курсов и учебных пособий по дисциплине «Инвестиционный анализ», являющейся частью блока дисциплин предметной подготовки стандартов экономических специальностей в системе высшего профессионального образования.

## **Основная часть**

### **Постановка задачи**

Применительно к исследованию влияния эффекта якоря при формировании прогнозов развития экономики можно ожидать его проявления в двух основных формах. Во-первых, можно предположить, что порядок поступления доступной информации оказывает влияние на значение прогнозного параметра; во-вторых, в процессе формирования прогнозов также сказывается психоэмоциональное состояние субъекта.

Первый эффект состоит в том, что при прогнозировании экономических параметров значения прогнозов будут зависеть от последних доступных числовых данных. В нашем случае при прогнозировании уровня инфляции значения прогноза будут тяготеть к ретроспективным показателям инфляции независимо от релевантности доступных данных.

Влияние психоэмоционального состояния при формировании прогнозов может проявляться по-разному. Однако при всем многообразии возможных эффектов следует в первую очередь остановиться на изучении эффектов, проявление которых можно верифицировать, исходя из доступных данных.

### **Описание эксперимента**

Для достижения цели исследования была реализована процедура, включающая два последовательных этапа. На первом этапе предлагалось заполнить анкету теста Моудсли на

оценку тревожности, ригидности и экстравертности. Значения их индексов были рассчитаны в соответствии с [4]. На втором шаге респондентам предлагалось сформировать прогнозы уровня инфляции в России на 2014 г.

Для корректной реализации эксперимента важно, чтобы респонденты могли адекватно судить о природе инфляционных процессов. В данном случае в качестве респондентов были привлечены студенты первого курса технических факультетов НИУ ИТМО, которым на момент проведения эксперимента были прочитаны соответствующие разделы вводного курса экономической теории.

На втором этапе в качестве доступной информации респондентам демонстрировались слайды с данными по инфляции за 2009–2011 гг. по трем макрорегионам: страны Евросоюза (со сравнительно низкой инфляцией), страны арабского мира (со средней инфляцией) и страны Центральной Азии и Китай (со сравнительно высокой инфляцией) [5]. Данные по инфляции (по индексу потребительских цен – ИПЦ) приведены в Табл. 1–3, а сами слайды в Приложении 1.

Таблица 1

Инфляция в странах – членах Европейского союза

Регион / страна	Значение показателя инфляции (ИПЦ)		
	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Евросоюз	0,8 %	1,8 %	3,3 %
Германия	0,3 %	1,1 %	2,1 %
Испания	-0,3 %	1,8 %	3,2 %
Греция	1,2 %	4,7 %	3,3 %

Таблица 2

Инфляция в Арабском мире

Регион / страна	Значение показателя инфляции (ИПЦ)		
	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Арабский мир	2,9 %	4,0 %	4,4 %
Бахрейн	2,8 %	2,0 %	-0,4 %
Саудовская Аравия	5,1 %	5,3 %	5,0 %
Объединенные Арабские Эмираты	1,6 %	0,9 %	0,9 %

Таблица 3

Инфляция в Центральной Азии и Китае

Регион / страна	Значение показателя инфляции (ИПЦ)		
	2009 г.	2010 г.	2011 г.
Центральная Азия и Китай	3,5 %	6,1 %	7,7 %
Казахстан	7,3 %	7,1 %	8,3 %
Китай	-0,7 %	3,3 %	5,4 %
Таджикистан	6,4 %	6,4 %	12,4 %

Для проверки проявления эффекта якоря в качестве доступных респондентам были предоставлены данные, которые обладают весьма условной ценностью для формирования прогноза, поскольку относятся к периоду, сильно удаленному от 2014 г. и не содержат информации по прогнозам важнейших макроэкономических показателей для России.

Респонденты были разделены на три группы. Группам демонстрировались одни и те же слайды, но в разном порядке. Непосредственно в момент формирования прогноза первой группе демонстрировался слайд с данными по инфляции макрорегиона с самой высокой инфляцией, второй и третьей группе – данные по макрорегионам со средней и низкой инфляцией соответственно.

Данная процедура позволяет проверить в рамках эксперимента следующую гипотезу: средние оценки уровня инфляции в России в 2014 г. должны статистически значимо отличаться по крайней мере для первой и третьей группы.

Проверка влияния психотипа на прогноз инфляции проводится на основе линейной регрессии вида:

$$Infl = C_0 + C_1Anex + C_2Rig + C_3Extr + \varepsilon. \quad (1)$$

Здесь  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – коэффициенты регрессии;  $Infl$  – прогноз индекса потребительских цен в России в 2014 г.;  $Anex$  – индекс тревожности по Моудсли;  $Rig$  – индекс ригидности по Моудсли;  $Extr$  – индекс экстраверсии по Моудсли;  $\varepsilon$  – слагаемое ошибки.

Построение данной регрессии позволяет проверить гипотезы, связанные с влиянием психотипа на формирование прогноза инфляции. Можно ожидать, что для респондентов с высокой тревожностью будут характерны более высокие значения прогноза инфляции, то есть коэффициент  $C_1$  будет значимо положительным. При данной спецификации модели значимое влияние ригидности и экстравертности должно было проявиться в виде значимости коэффициентов  $C_2$  и  $C_3$  соответственно в регрессиях, построенных для отдельных групп.

#### Анализ полученных данных и результатов исследования

Всего в эксперименте приняло участие 137 респондентов. В первой группе – 40, во второй – 38 и в третьей – 59 человек. После внесения данных из рассмотрения были исключены наблюдения, в которых прогноз инфляции не был указан (одно наблюдение) или существенно отличался от установленного максимального порога 20 % (два наблюдения), так как они могли исказить результаты исследования. Таким образом третья группа сократилась до 56 человек.

Статистическая значимость различия средних значений в разных группах проводилась в пакете PSPP. Данные о численности респондентов в группах и средних значениях прогнозов инфляции в России в 2014 г. приведены в Табл. 4.

Таблица 4

Средние значения прогнозных темпов инфляции (ИПЦ) в России в 2014 г.

Группа	Численность респондентов, чел.	Средние значения прогнозов инфляции, %	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка средней
Выборка целиком	136	7,55	3,11	0,27
Группа 1	40	8,30	3,14	0,50
Группа 2	38	7,88	3,34	0,54
Группа 3	56	6,79	2,80	0,37

Как видно из Табл. 4, средние оценки для прогнозов темпов инфляции в России в 2014 г. отличаются для разных групп. В первой средняя оценка составляет 8,3 %, во второй – 7,88 %, а в третьей – 6,79 %. При этом статистически значимым является различие в значениях средних значений между первой и третьей группами (односторонняя значимость на уровне 0,01). Это позволяет констатировать, что в рамках эксперимента удалось зафиксировать проявление эффекта якоря.

В то же время, на основе регрессий вида (1), оцененных методом наименьших квадратов в эконометрическом пакете Gretl как для выборки в целом, так и отдельно по группам не удалось выявить значимого влияния тревожности, ригидности и экстравертности на прогнозную оценку уровня инфляции. Коэффициенты регрессии при независимых переменных (за исключением константы) были не значимы. Ситуация не менялась при последовательном исключении наиболее незначимых переменных. Пример оценивания регрессии вида (1) для полной выборки по методу наименьших квадратов приведен в Приложении 2.

Наличие или отсутствие влияния переменных, характеризующих психоэмоциональное состояние респондентов на формирование прогнозов инфляции, требует дополнительного

изучения. Для более точной проверки второй гипотезы требуется больший объем выборки и, возможно, уточнение спецификации эконометрической модели. Кроме того, влияние на то, что искомые эффекты не проявились, могло оказать достаточно малое различие уровня инфляции Евросоюза и Арабского мира.

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что эффект якоря оказывает влияние на процесс прогнозирования экономических показателей. О наличии данного эффекта свидетельствует статистически значимое различие средних прогнозируемых темпов инфляции в России в 2014 г. для групп, которым в последнюю очередь были доступны данные о сравнительно высокой и сравнительно низкой инфляции.

В тоже время наличия устойчивого влияния таких психологических показателей, как тревожность, ригидность и экстравертность на процесс прогнозирования экономических показателей не выявлено и требует дальнейшего изучения.

#### Приложение 1

Слайды, представленные респондентам (приведена очередность для первой группы)

	2009	2010	2011
<b>Евросоюз</b>	<b>0,8%</b>	<b>1,8%</b>	<b>3,3%</b>
Германия	0,3%	1,1%	2,1%
Великобритания	2,2%	3,3%	4,5%
Франция	0,1%	1,5%	2,1%

	2009	2010	2011
<b>Арабский мир</b>	<b>2,9%</b>	<b>4,0%</b>	<b>4,4%</b>
Бахрейн	2,8%	2,0%	-0,4%
Саудовская Аравия	5,1%	5,3%	5,0%
Объединенные Арабские Эмираты	1,6%	0,9%	0,9%

	2009	2010	2011
<b>Развивающиеся страны Центральной Азии и Европы</b>	<b>3,5%</b>	<b>6,1%</b>	<b>7,7%</b>
Казахстан	7,3%	7,1%	8,3%
Китай	-0,7%	3,3%	5,4%
Таджикистан	6,4%	6,4%	12,4%

## Приложение 2

Результаты оценивания регрессии для полной выборки (использованы наблюдения 1–134, зависимая переменная: *Infl*)

Индексы	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
const	6,38435	1,99701	3,1970	0,00174
Апех	0,0128122	0,0284584	0,4502	0,65331
Rig	-0,0140583	0,022793	-0,6168	0,53846
Extr	0,0233254	0,0284507	0,8199	0,41380

Показатель	Значение	Показатель	Значение
Среднее зависимой переменной	7,548657	Стандартное отклонение зависимой переменной	3,112016
Сумма квадратов остатков	1271,748	Стандартная ошибка модели	3,127728
R-квадрат	0,012662	Скорректированный R-квадрат	-0,010123
F(3, 130)	0,555721	P-значение (F)	0,645211
Логарифмическое правдоподобие	-340,9084	Критерий Акаике	689,8168
Критерий Шварца	701,4082	Критерий Хеннана-Куинна	694,5272

## Публикации

1. Бельх А.В., Григорьев И.В., Егоров Д.Н. Влияние эффекта якорения при прогнозировании макроэкономических показателей // Журнал правовых и экономических исследований. 2013. № 4. С. 78–82.

## Литература

1. *Tversky A., Kahneman D.* Judgment under uncertainty: Heuristics and biases // Science. New Series. 1974. Vol. 185. No 4157. P. 1124–1131.
2. *Kahneman D., Frederick S.* Representativeness revisited: Attribute substitution in intuitive judgment // T. Gilovich, D. Griffin, D. Kahneman (eds.). Heuristics and biases: The psychology of intuitive thought. New York, 2002. P. 49–81.
3. *Ariely D.* Predictably irrational: The hidden forces that shape our decisions. New York, 2008. – 304 p.
4. Методика самооценки тревожности, ригидности и экстравертированности (по Д. Моудсли) // Диагностика эмоционально-нравственного развития / Ред. и сост. И.Б. Дерманова. СПб., 2002. С. 129–132.
5. Сайт Всемирного банка:  
<http://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG/countries?display=default>.



Борисова Иоланта Александровна  
Факультет гуманитарный  
Кафедра менеджмента  
E-mail: iolanta 1986@mail.ru

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КЛАСТЕРОВ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ

И.А. Борисова

Научный руководитель – профессор В.И. Подлесных

### Введение

В условиях объявленной руководством страны всеобщей модернизации, в качестве эффективного решения выступает концепция устойчивого развития. Необходимость перехода к этой стратегии была принята на конференции ООН в Рио-де-Жанейро в 1992 г. Кризисы последних лет обострили внимание к ней ученых и практиков, поскольку экономическая устойчивость хозяйствующих субъектов в условиях нарушения многих воспроизводственных отношений превратилась в одну из ключевых задач.

Требование устойчивого развития приводит к необходимости разработки теории и методологии экономической устойчивости, критериев и критических значений социально-экономических показателей, определяющих границы эффективного, безопасного и устойчивого развития кластеров, как перспективной формы модернизации российской экономики. Однако, в научном плане вопросы устойчивого развития кластера изучены далеко не полностью. Особенно это касается разработки новых подходов, методов, моделей и механизмов обеспечения устойчивого развития.

### Анализ зарубежного и отечественного опыта формирования и устойчивого развития кластерных структур

В современных условиях рыночной экономики, растущей глобализации с высоким уровнем неопределенности и кризисными явлениями, кластеры проявляют себя как наиболее эффективные и гибкие структуры. Их адаптивные свойства во многом достигаются за счет сочетания и соблюдения оптимальных пропорций сотрудничества и конкуренции.

Анализ и сравнительная оценка, имеющихся в литературе определений, позволяют сформулировать понятие «кластер» как объединение географически соседствующих предпринимательских структур, взаимодействующих друг с другом на принципах технологической кооперации в родственных отраслях, обеспечивающих за счет этого синергетический эффект, повышающий уровень своей конкурентоспособности и экономической эффективности деятельности территории.

**Опыт стран Америки (на примере США и Канады).** Популяризация кластеров в экономике США приходится на конец 80-х годов XX в. Тогда были созданы комиссии по созданию кластеров, которые распределяли доли участников и помогали преодолевать трудности. Первоначальный капитал выделялся штатом, затем привлекались средства частных компаний. В США выделяют около 20 кластеров в таких областях производства как: аэрокосмическая техника, информационные технологии; медицинское оборудование, биотехнологии, химия и др.

На долю кластера «Кремниевая долина» приходится 1/3 всех венчурных капиталовложений в США. На его территории сконцентрированы высокотехнологичные компании, разработчики и производители микропроцессоров, программного обеспечения, устройств мобильной связи и другой продукции сферы информационных технологий [1].

В Канаде насчитывается 50 кластеров, ведущая роль в создании которых принадлежит Научному исследовательскому совету (НИС). Он выделяет ключевые факторы их формирования и развития (наличие государственной исследовательской лаборатории или университета, способных заниматься передачей технологий и создавать новые предприятия; сети для обмена информацией потенциальными участниками кластера, квалифицированных кадров; необходимость привлечения финансовых ресурсов и др).

Одна из стратегий создания кластеров предусматривает создание в регионе нового исследовательского центра, вокруг которого формируется кластер, при этом основное внимание уделяется на первоначальном этапе построению сетевого взаимодействия между компаниями, входящими в него (например, кластер электронной коммерции в Нью-Брансуике). Другая стратегия заключается в создании кластера на базе имеющейся инфраструктуры (биотехнологический кластер в Монреале) [2].

**Опыт стран Азии (на примере Китая).** В 2001 г. Министерство науки и технологий КНР обнародовало концепцию инновационного развития, согласно которой создание инновационных кластеров должно осуществляться за счет развития инновационного потенциала действующих промышленных кластеров на основе экономических успехов государственных зон технико-экономического развития и других льготных образований.

Шанхайский кластер «Чжанцзян» создан на базе Парка высоких технологий, который в 1999 г. переориентирован на «Три главных стратегических направления»: интегральные схемы, компьютерное программное обеспечение, биофармацевтика. За 10 лет промышленное производство парка выросло в 14 раз, доход – в 25 раз, собираемость налогов – в 51 раз. Китай лидирует в рейтингах по регистрируемым патентам и научным публикациям. В 2010 г. удельный вес вновь освоенных видов продукции в объеме валового промышленного продукта КНР составил 9,94 % (в 2009 г. – 9,7 %). В высокотехнологичных отраслях доля вновь освоенных видов продукции составила 20,3 % (в 2009 г. – 19,96 %) [2].

**Опыт европейских стран (на примере Дании и Финляндии).** В Дании функционирует 29 кластеров, большая часть которых создана на базе институтов, университетов и бизнес-школ. Управление ими осуществляет Министерство науки, технологий и развития. Кластеры обладают высоким уровнем взаимосвязи теоретических исследований и их практической реализацией. В них участвует около 40 % всех фирм страны, и они обеспечивают до 60 % экспорта.

Лидерство Финляндии в отраслях информационных технологий и беспроводной связи, металлообработки, лесоперерабатывающих и энергосберегающих технологий, биотехнологии, строительных и природоохранных технологий обеспечивается деятельностью девяти кластеров [3]. Политика Финляндии по развитию инновационной деятельности направлена на совершенствование институциональной среды и государственное комплексное содействие фирмам, ведущим исследования на всех этапах деятельности (от оказания финансовой помощи до предоставления услуг). Государство осуществляет экспертные оценки инновационных проектов и, при их соответствии приоритетным направлениям, финансирует до 50 % работ, а также способствует расширению сотрудничества между участниками исследовательских работ, в том числе на международном уровне.

**Опыт создания кластеров в России (на примере Санкт-Петербурга).** В 2012 г. в сформированный «Перечень пилотных программ развития инновационных территориальных кластеров», вошли 25 кластеров, специализирующихся на таких направлениях как: медицина и фармацевтика, химическая промышленность, ядерные технологии, нефтегазопереработка и нефтегазохимия, производство летательных и космических аппаратов, судостроение и автомобилестроение, информационно-коммуникационные технологии. Кластеры, прошедшие отбор сформированы на базе бывших наукоградов и технико-внедренческих зон [4].

Кластер информационных технологий, радиоэлектроники, приборостроения, средств связи и инфотелекоммуникаций, расположенный в Санкт-Петербурге, обладает высоким научным, образовательным и производственным потенциалом. Он опирается на наличие развитой научно-исследовательской инфраструктуры, активных разнообразных и взаимодополняющих

научных групп и производств, исторически сложившихся научных школ. Проекты кластера отражают высокий уровень вертикальной и горизонтальной интеграции. Объем частных инвестиций в развитие производства, разработку и продвижение на рынок новых продуктов ожидается довести к 2016 г. до 19,1 млрд руб. Объем расходов кластера на НИОКР за последние пять лет достиг 5,1 млрд руб., а к 2016 г. планируется выйти на уровень 21,5 млрд руб. [5].

Правительство Санкт-Петербурга, предприятия города и Союз промышленников и предпринимателей (работодателей) реализуют стратегию создания кластера производителей автокомпонентов. Этот кластер признается одним из наиболее динамично развивающихся и перспективных. Совокупный объем инвестиций компаний в строительство новых автомобильных производств составил около 1,3 млрд долларов США. Общий объем расходов бюджета Санкт-Петербурга на реализацию инвестиционных проектов составил 6,6 млрд руб. [6].

### **Анализ организационно-управленческих проблем функционирования и развития кластеров**

В России кластерный подход внедряется с опозданием на 20–30 лет, что дает возможность использовать опыт зарубежных стран. Однако, нельзя не учесть, что в этот отрезок времени произошли значительные изменения в мировом технико-экономическом развитии, а вместе с тем изменились и организационно-управленческие механизмы. Глобализация мировой экономики, несоответствие современной экономической науки и методов организации производственных процессов темпам эволюции технико-экономического развития, кризис, рост неопределенности – эти и другие перемены в экономическом развитии подводят нас к необходимости создания новой теоретической базы, направленной на формирование и развитие кластеров.

Зарубежный и отечественный опыт формирования и развития кластерных структур позволяет выделить ряд организационно-управленческих проблем.

1. Отсутствие системного подхода к формированию и развитию кластеров ведет к неэффективной инновационной инфраструктуре. Единство и комплексность функциональной, элементной и организационной составляющих кластера с позиции системного подхода позволяют обоснованно решать задачи оптимизации его структуры.

2. Нерациональная организационная структура кластера свидетельствует о непонимании того, какой опыт, технологию, ресурсы и пр. может дать компания кластеру в целом. Избежать этого можно соблюдением принципов разделения труда и сочетания конкуренции и сотрудничества, а также ведя учет ресурсов и вклада участников. Например, вуз может предоставить кластеру технологии, помещения, НИР и ОКР, кадровые ресурсы; местная администрация – землю, инфраструктуру, гранты; банки – специальные кредитные программы для участников кластера, а также внести свой вклад в финансовую экспертизу; промышленные предприятия – предложить землю, инфраструктуру, капиталовложения, экспертизу проектов и др.

3. Нерациональный состав участников кластера и несоответствие уровня технического и технологического развития, а также поведенческих особенностей различных отраслей в рамках единого производственно-технологического процесса тормозит развитие и препятствует формированию синергетического эффекта.

4. Недостаточная квалификация руководителей и сотрудников ввиду отсутствия опыта управления подобными структурами препятствует внедрению новой техники и технологий, затрудняет использование инновационного потенциала кластера и замещение технологического уклада. Избежать подобных проблем поможет соблюдение принципа непрерывного обучения для всех категорий персонала кластера.

5. Отсутствие общей концепции управления выражается в неверном распределении функций, прав, обязанностей и ответственности между членами кластера.

6. Отсутствие планирования количественных показателей научно-технической и промышленной деятельности кластеров ведет к автономному функционированию

и отсутствию согласованности между участниками кластера, а также к снижению доли сотрудничества и обмена информацией между ними.

7. Территориальная отдаленность участников кластера и неразвитость инфраструктуры осложняет процесс взаимодействия между ними и ведет к росту затрат.

8. Отсутствие взаимодействия и сотрудничества между участниками кластера связано с недооцененной роли сотрудничества с компаниями смежных отраслей и с потенциальными конкурентами. В результате фактически исключаются внутренние механизмы развития.

9. Проблемы в области государственной поддержки кластерных инициатив и базы налогообложения выражены несистемностью усилий государства в области развития кластеров.

10. Проблема самоорганизации в российских кластерах. Самоорганизация – это основной принцип развития кластерных структур. Чтобы адаптироваться к меняющимся условиям внешней среды, участники самостоятельно и непрерывно отслеживают необходимость корректировки поставленных задач, внедрения новых технологий, сотрудничества, изменения структуры и др. Инициатива, например, кооперации и сотрудничества должна исходить «снизу вверх», от участников к руководящему органу кластера (или к государственным органам власти), а не наоборот.

В решении перечисленных проблем должны быть задействованы все участники кластера, а также местные органы власти, что позволит достичь эффективной деятельности кластера и его частей.

### **Современные подходы к обеспечению устойчивого развития экономики**

Кризис 2008-2009 гг. принес России потери порядка 40 % ВВП страны, также произошло ухудшение структуры экономики, ее деиндустриализация и усиление технологического отставания [7]. Подобные кризисы в экономике являются следствием формирования новых производств, которые базируются на новых технологиях и являются более эффективными и конкурентоспособными, чем уже существующие.

Невосприимчивость экономики России к инновациям, ее стагнация и депрессия свидетельствует о неадекватности доминирующей организационно-управленческой доктрины, вследствие чего в развитии экономики наблюдается системный кризис. Решение этих задач требует поиска альтернативных подходов к эффективному развитию как экономики в целом, так и составляющих ее структурных образований. В экономическую науку необходимо ввести новые понятия, сформулировать новые подходы, методы, модели и механизмы, разработать новые теории, позволяющие лучше отобразить и понять изменяющуюся реальность с ее возрастающими рисками, энтропией, неопределенностью, которые бы обеспечили системное единство технологических, экономических и социальных процессов организации, управления и самоорганизации. К числу таких подходов, методов и теорий относятся:

– теория замещения технологического уклада, построенная на основе смены технологических укладов (Н.Д. Кондратьев, Йозеф Шумпетер, С.Ю. Глазьев, Д.С. Львов, В.Е. Дементьев, Б.Н. Кузык, В.И. Маевский и др.);

– теория инноваций, обеспечивающая возможность преодоления кризисов и спадов в производстве за счет обновления капитала через технологические, организационные, экономические и управленческие нововведения (Н.Д. Кондратьев; Йозеф Шумпетер, Герхард Менш, Ю.В. Яковец, В.И. Кушлин и др.);

– кластерная теория экономического развития – переход от отраслевого подхода к кластерам способствует развитию инноваций и повышению конкурентоспособности государства на мировой арене (М. Портер);

– теория синергетического развития, ориентированная на синергетические технологии, мягкое резонансное управление, получение синергетических эффектов (а не на прирост ВВП), а также самоорганизацию, в основе которой лежат процессы формирования порядка и хаоса (Г. Хакен, И.Р. Пригожин, Н.Н. Моисеев, А.А. Самарский, С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Б.Л. Кузнецов и др.).

### **Новый подход к формированию и развитию кластеров на основе замещения технологического уклада в экономике**

С.Ю. Глазьев объяснил циклический характер развития экономики через замещение технологических укладов [7]. В развитии экономики важная роль принадлежит совокупностям технологически сопряженных производств, представляющих собой доминирующий технологический уклад.

Доминирующий в передовых странах V технологический уклад переходит в завершающую фазу развития, на этапе зарождения находится VI технологический уклад. В России преобладают технологии IV (более 50 %) и III (30 %) технологических укладов. Доля распространения V и VI укладов составляет соответственно 10 и 1 %. Развитие старых производств приводит к кризисным явлениям, так как менеджмент не успевает заниматься инновациями.

Например, низкий уровень конкурентоспособности отечественных автомобилей объясняется тем, что финансовые вложения в развитие отрасли не подкреплены инновационными разработками.

Сокращение технологического отставания, становление и развитие технологий VI уклада невозможно без освоения технологий, форм и методов организации производства (таких как кластеры) V уклада. Решение проблемы технологического отставания возможно с помощью двух сценариев:

- использование и развитие собственной технологической базы, обеспечивающей постепенное развитие – классический метод;
- заимствование зарубежных передовых технологий при наращивании собственного инновационного потенциала – ускоренный метод.

Воплощение первого сценария обеспечивает рост темпа технического прогресса до 3 %, а при втором до 7-8 %. Максимальный эффект можно получить сочетая усилия по заимствованию передовых зарубежных технологий и методов хозяйствования с наращиванием собственного инновационного потенциала. Такое распределение заимствования и развития собственных инновационных технологий обеспечивает устойчивость, стабильность, гармоничность и эффективность развития кластеров [8].

В свете новой модернизационной политики представляется обоснованным в качестве теоретических основ нового подхода к формированию и обеспечению устойчивого развития кластеров принять синтез положений теорий технологических нововведений, системно-синергетического развития, теории управления и экономической теории [8].

Анализ и синтез представленных теорий позволил сформулировать новую концепцию развития кластеров, разработать новый (синергетический) подход и методы обеспечения их устойчивого развития.

Синергетический подход к обеспечению функционирования и развития кластеров предполагает что:

- процесс организации в развитии кластера первичен;
- в основе развития кластера лежит процесс самоорганизации;
- управление в кластерах ориентировано в первую очередь на поиск инноваций, разработку и внедрение новых технологий;
- основой развития является соблюдение оптимального соотношения и взаимодействия процессов организации, самоорганизации и управления.

Применение синергетического подхода позволяет предотвратить хаос и использовать новые механизмы, методы и модели обеспечения устойчивого развития кластера [8]. Этот подход к кластерным структурам означает, что в основе их развития и повышения эффективности деятельности лежит сотрудничество между предпринимательскими структурами различных отраслей. Поэтому важно выявить такие механизмы взаимодействия, которые обеспечивают максимальный синергетический эффект.

С позиции теории организации ключевым моментом, характеризующим сложность кластерных структур, является их разнообразие. Поэтому определение степени оптимального

разнообразия функциональной, элементной и организационной составляющих является одним из наиболее важных и первоочередных этапов формирования кластеров.

Кластерные взаимодействия осуществляется главным образом посредством горизонтальных связей. От умения членов кластера использовать внутренние и мобилизовать внешние ресурсы, зависит эффективность их взаимодействия, от качества взаимодействия зависит гибкость и устойчивость к постоянно меняющимся условиям внешней среды. В структуре кластера нужно учесть, что синергетический эффект, как следствие раскрытия внутреннего потенциала развития, невозможен без наличия «критической массы» участников. При минимально необходимой для формирования синергетического эффекта «критической массе» из 30–50 участников возможно более 1500 сочетаний их взаимодействий [9].

Соблюдение закона необходимого и достаточного разнообразия среди участников кластера позволяет создавать неожиданные и перспективные комбинации. Обмен технологиями, объединение во временные проектные группы специалистов из разных отраслей, и их непрерывное обучение – способствуют появлению новых инновационных направлений. Хорошо организованная схема взаимодействий и сотрудничества в кластере позволяет осуществлять «переброс» технологий, идей и знаний из одних технологических цепочек в другие.

Синергетический эффект может быть получен в результате объединения, сотрудничества и взаимодействия участников кластера из разных отраслей, например, появление радиофармпрепаратов обязано своим появлением сочетанию радиационных технологий и фармацевтики.

Методологической основой синергетического подхода является метод гармонического взаимодействия процессов организации, самоорганизации и управления, как ключевых процессов формирования и обеспечения устойчивого развития кластерных структур за счет замещения технологического уклада. Метод построен на определении динамики соотношения (пропорций) этих процессов с постепенным повышением роли самоорганизации.

### **Метод определения пропорций и взаимодействия механизмов организации, самоорганизации и управления в системе гармонического развития кластеров**

Процесс устойчивого развития кластера, как и любой процесс, требует предварительной организации. В дальнейшем поддержание процесса динамического развития возможно, как за счет самоорганизации и самоуправления, так и за счет управления им. Таким образом, обеспечение процесса динамического развития кластера определяется следующими взаимосвязанными фундаментальными процессами: организации, самоорганизации и управления.

Процесс самоорганизации является движущим фактором развития кластерной структуры, способствующим замещению технологического уклада. Но самоорганизация невозможна без фундаментальной науки, без образованных и дисциплинированных руководителей и сотрудников, способных понимать ситуацию и служить стране, а не только собственному благополучию. Поэтому перед современной наукой встает задача определения гармоничного соотношения и взаимодействия организации и самоорганизации.

Организация и самоорганизация – это две стороны единого организационного процесса, которые представляют его с двух сторон (внешней и внутренней).

Процесс организации кластера и построение структурообразующей модели выполняются на основе системного подхода (с выделением функциональной, элементной и организационной структуры). Построение функциональной модели обосновывает целесообразность организации кластера, помогает определить его функции в целом и его частей (участников), состав выполняемых процессов и задач.

Элементный аспект обеспечивает целостность кластерной структуры. Он предусматривает построение кластера как системы, устанавливает его элементный состав и критическую массу участников. Организационное построение устанавливает структуру кластера, ясную и точную цель для каждого участника и реализует задачи, предписанные их функциональным назначением. Структура объединяет части кластера в единое целостное образование, определяет систему, правила и направленность взаимодействия участников.

Системный подход к построению кластера обеспечивает долгосрочное устойчивое функционирование основного, вспомогательного, исследовательского и инновационного процессов. Устойчивое гармоничное развитие кластера обеспечивается законом композиции и характером взаимодействия участников производственного, исследовательского и инновационного процессов (руководители, сотрудники, технические средства производства, информационное, финансовое, правовое обеспечение и др.).

Самоорганизация в эффективно функционирующем кластере преобладает и направлена на непрерывное улучшение бизнес-процессов каждого элемента кластерной структуры. Изменение соотношения между организацией и самоорганизацией принципиально меняет: технологию производственного процесса; организацию труда сотрудников кластера; структуру производственного обеспечения; взаимодействие членов кластера; эффективность процесса развития кластерной структуры. Поэтому важно определить каким образом реализуется взаимодействие процессов самоорганизации и организации. Абсолютизация любого из них ведет к снижению эффективности деятельности кластера, а тесное и непрерывное взаимодействие, напротив, является залогом устойчивого и динамического развития.

Исследования проблемы гармоничного соотношения категорий организации и самоорганизации проведено и представлено в биологической сфере Н.И. Кобозевым [10]. Он показал, что максимальный объем результата деятельности системы достигается при соотношении организации и самоорганизации в пропорции 2/3 – организации и 1/3 – самоорганизации, что близко к пропорции золотого сечения. То есть в гармоничной системе порядок (организация) должен преобладать (0,60) над самоорганизацией – (0,40).

Применительно к кластерным структурам это соотношение выглядит следующим образом:

– организация (60 %) – воздействие на сотрудников и инициатива процесса взаимодействия между партнерами кластера со стороны учредителей и руководителей (организация производственного процесса);

– самоорганизация (40 %) – самостоятельная работа со стороны сотрудников предпринимательских структур кластера в области взаимодействия и поиска новых технологических решений и перспективного сотрудничества (на основании результатов исследования Н.И. Кобозева).

Такое соотношение можно рассматривать как проявление гармонического построения кластера на начальном этапе, но в дальнейшем доля самоорганизации должна стремиться к 60 %.

Таким образом, в качестве ведущего критерия гармонии между организацией и самоорганизацией можно считать соотношение хаоса и порядка, которые стремятся к пропорции золотого сечения. Однако самоорганизация не всегда приводит к гармонии. Так, например, ослабление контроля за самостоятельной работой сотрудников может нарушить гармонию кластера. Поддержание гармонического развития осуществляется через мягкое резонансное управление, главной функцией которого является поиск инновационных направлений развития науки и экономики, новых форм и методов реализации производственных процессов, новых форм и точек взаимодействия с другими предпринимательскими структурами и формирование синергетического эффекта.

Распределение полномочий, ответственности и подчиненности в кластерах может быть представлено двумя полярными способами построения структур:

– иерархии, когда все действия и функции управления четко распределены между предпринимательскими структурами кластера, их сотрудниками и руководителями;

– гетерархии, когда все руководители и сотрудники предпринимательских структур кластера руководствуются лишь правилами игры и ситуацией.

Таким образом, во взаимодействиях процессов организации и управления с одной стороны и самоорганизации – с другой, выделяются два предельных состояния: иерархия, то есть полное подчинение одних взаимодействий другим, и гетерархия, когда подчинение опосредовано совокупностью неоднородных взаимодействий.

Процесс развития кластера сопровождается дрейфом между их предельными состояниями. В границах этого дрейфа (0,38–0,62) можно выделить основанные процессы развития кластера:

- на принципах кластерной организации и управления со стороны учредителей и руководителей – 0,62;
- на принципах самоуправления – 0,38.

Однако, следует иметь в виду, что это соотношение характерно для начальной стадии существования кластера. В дальнейшем степень самоорганизации должна возрастать до 75–90 %. В этом случае руководители выполняют функцию контроля, осуществляют поиск и информативную работу по инновационным разработкам, новым методам, моделям и т. п.

### **Организационные модели и научно-практические рекомендации по взаимодействию механизмов и процессов организации, самоорганизации и управления**

Учесть тенденции развития, определить роль управления, не нарушить естественные процессы самоорганизации в кластере, поможет соблюдение определенных принципов, моделей и практических рекомендаций взаимодействия механизмов организации, управления и самоорганизации:

- организация всех процессов кластера первична, в том числе в организации нуждаются процессы кооперации и сотрудничества предпринимательских структур (ПС), где сотрудничество может осуществляться в производственных, организационных, управленческих, информационных, образовательных и финансовых процессах, рис. 1 (блок 1).;
- управление вторично и должно использоваться периодически (временно) и целенаправленно (блок 2);
- по результатам анализа взаимодействия ПС (блок 3) принимается решение о возможности перевода кластера в режим индивидуальной самоорганизации;
- переход в режим индивидуальной самоорганизации (блок 4) означает не полное отсутствие процесса организационно-управленческого воздействия (блок 5), а смену его направленности на поиск, передачу и освоение инноваций. Продолжительность доминирования организационно-управленческих воздействий определяется временем, необходимым для создания условий для перехода к повторной самоорганизации.
- в режиме индивидуальной (первичной) самоорганизации функционирование кластера характеризуется определенным стабильным или нарастающим уровнем показателей эффективности функционирования и развития;
- принцип обратной связи позволяет в режиме индивидуальной самоорганизации автоматически на основе информации о показателях развития ПС, при их малых отклонениях от среднего значения параметров развития, осуществлять регулирование в режиме индивидуального самоуправления;
- в случае отклонения значений параметров развития от заданных (при рассогласовании в процессах организации и самоорганизации; при отрицательной динамике производственных, технологических, исследовательских, инновационных и других процессов) кластер переводится в режим доминирующих организационных процессов (блок 7), а самоорганизация сводится к минимально допустимому значению (блок 6);
- в дальнейшем проводится контроль за результатами взаимодействия ПС (блок 8), во-первых, за самостоятельной работой сотрудников, связанной с привлечением новых партнеров, внедрением и развитием технологий, развитием исследований и т. д., а во-вторых, за внедрением инноваций;

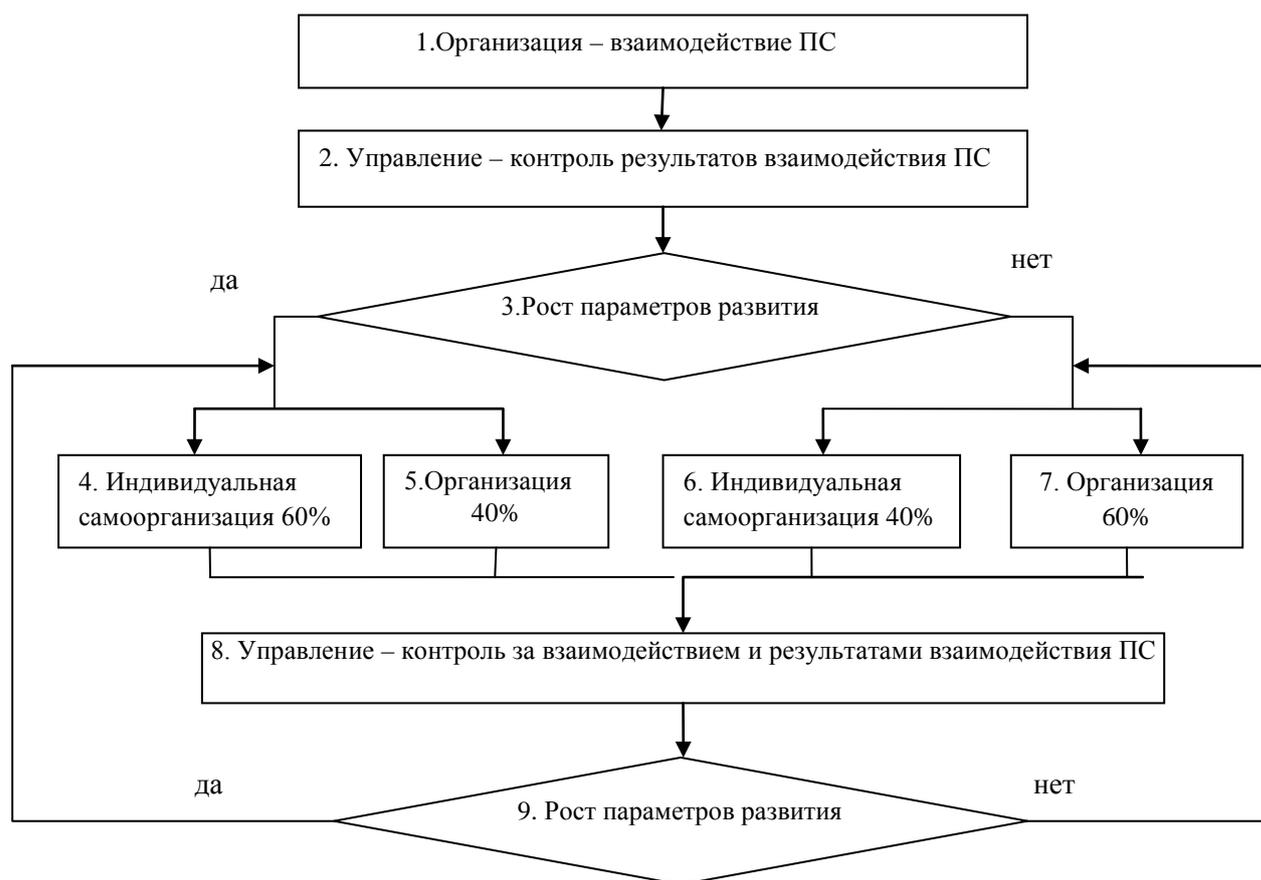


Рис. 1. Алгоритм взаимодействия процессов организации, самоорганизации и управления в кластерах

– в зависимости от полученных результатов (блок 9) принимается управленческое решение о сохранении или изменении доминирующего механизма (организации/самоорганизации).

Таким образом, в целях обеспечения устойчивого развития кластера при взаимодействии механизмов организации и самоорганизации, управление (блоки 3 и 9) решает две главные задачи:

– поиск инноваций, организация обучения, совместного освоения новых технологий, взаимодействие предпринимательских структур кластера в условиях новой информации и их внедрение, то есть модернизация снизу – формирование и развитие у сотрудников кластера новых обязанностей, знаний, умений, компетенций;

– системный анализ причин отклонений от нормального протекания производственных, исследовательских, инновационных и прочих процессов, в режиме организации и самоорганизации, разработка и внедрение мероприятий по ликвидации отклонений (управление по отклонениям).

Отсюда следует, что управление выступает в роли посредника при переходе кластера, его предпринимательских структур и их сотрудников, во-первых, с режима организации в режим самоорганизации, и, во-вторых, с режима первичной в режим повторной самоорганизации и т. д.

В успешно функционирующем кластере каждый из процессов управления и самоорганизации характеризуются своим уровнем показателей эффективности деятельности на данном этапе его развития. В случае значительного отклонения параметров развития происходит смена механизма воздействия на производственный процесс (с режима самоорганизации в режим управления).

Рассмотренная технология и логика взаимодействия механизмов управления и самоорганизации позволяют сформулировать следующие принципы, модели и практические рекомендации устойчивого функционирования и развития кластера (рис. 2):

- предпринимательские структуры и сотрудники, которые переведены с помощью управленческого воздействия со стороны руководителя в режим самоорганизации, могут находиться в этом состоянии длительное время (рис. 2, блок 1);
- для обеспечения устойчивого развития предпринимательских структур кластера в режиме самоорганизации необходим постоянный контроль за уровнем технологического развития, соответствием этому уровню сотрудников, выраженному в повышении квалификации, нарастании знаний, умений, компетентности и т. д. (блок 2);
- если результаты контроля показывают стабильный или нарастающий уровень развития технологий и компетентности сотрудников (блок 3), то это свидетельствует об эффективности самоорганизации и поэтому режим сохраняется (блок 4);
- в это время (в режиме самоорганизации) руководитель занимается поиском новых методов организации производственного, исследовательского, инновационного и прочих процессов, новой техники и технологий;
- при ухудшении параметров функционирования, отсутствии синергетического эффекта и/или несоответствии компетентности сотрудников система, находясь в режиме самоорганизации, подвергается управленческому воздействию (режим управления, блок 5);
- в этих условиях управленческое воздействие должно быть ориентировано на проведение системного анализа причин отклонения кластера и/или его сотрудников от параметров развития, анализ состояния связей в системе руководители-сотрудники и разработку мероприятий по совершенствованию системы самоорганизации (блок 6);
- по результатам анализа проводится управленческое воздействие (блок 7), направленное на совершенствование самоорганизации (и организации) соответствующих процессов (производственного, научно-исследовательского, инновационного и т. д.) (блок 8).

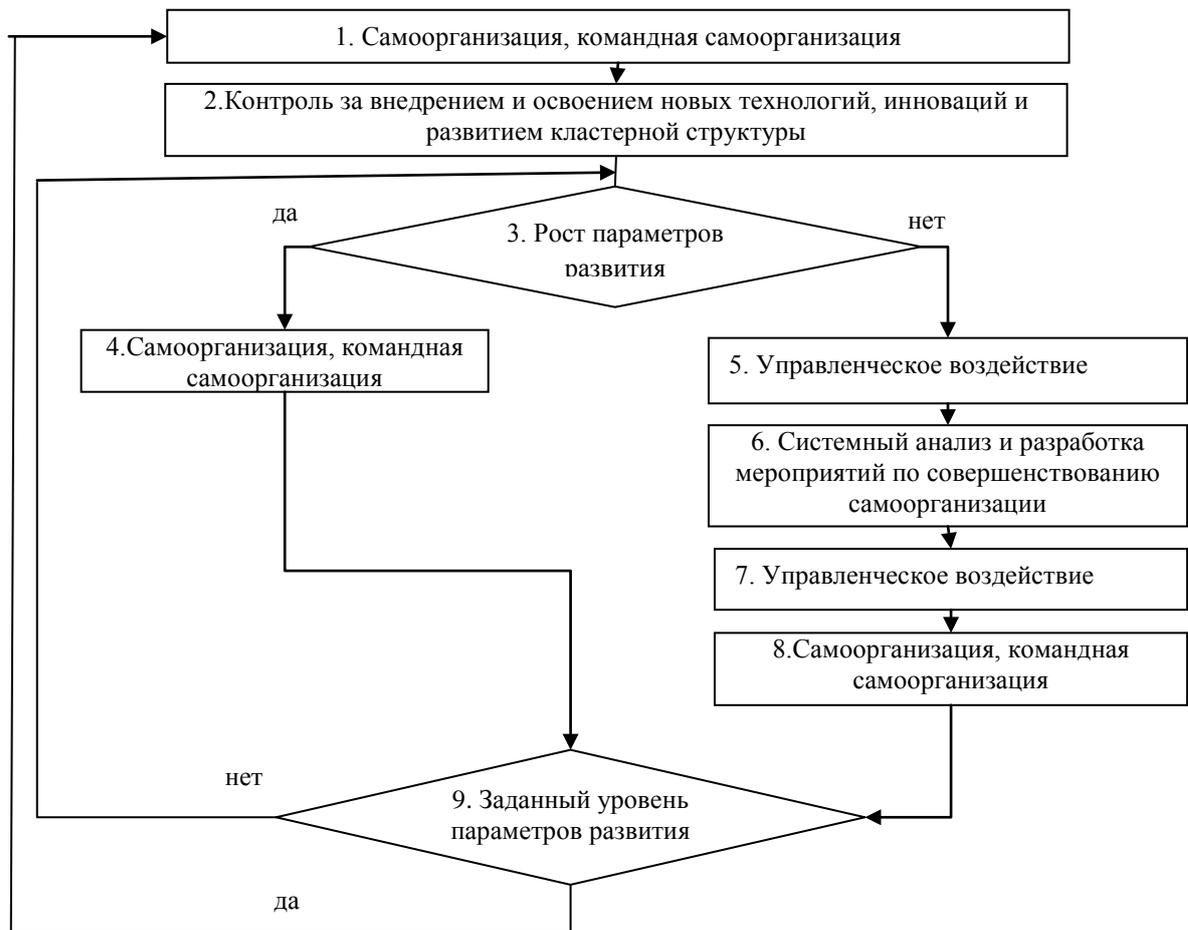


Рис. 2. Алгоритм взаимодействия механизмов управления и самоорганизации

Рассмотренная логика взаимодействия механизмов управления и самоорганизации, во-первых, обеспечивает закономерную и объективную цикличность взаимодействия процессов управления и самоорганизации. Во-вторых, позволяет воспринимать место управленческого воздействия, как точку роста технологического и инновационного развития кластера, так как оно всегда направлено на улучшение связей и взаимодействия между членами кластера, на рост параметров производственного процесса. В-третьих, такое управленческое воздействие можно отнести к категории мягкого резонансного управления, так как оно малое по затратам и направлено на создание синергетических эффектов.

Эффективность производственного процесса зависит от того, как участники кластера и его сотрудники «вписываются» в кластер. Руководители кластера и его частей, правильно понимая и доводя до сотрудников цели кластера, способствуют установлению необходимых связей (информационных, кооперационных и др.) и обеспечивают его эффективное функционирование.

### **Рекомендации и предложения по оценке эффективности устойчивого развития кластеров**

Внутренняя способность к выживанию, адаптации и развитию в постоянно меняющихся условиях внешней среды – есть устойчивость кластера, к основным формам которой можно отнести: кризисный, критический и нормативный уровни.

В кластерной структуре, обладающей кризисным уровнем устойчивости процессы организации, самоорганизации и управления построены таким образом, что структура неспособна адекватно реагировать и адаптироваться к условиям внешней среды.

Критический уровень устойчивости кластера предполагает систематическое приращение позитивного результата на минимальном уровне.

Нормативный уровень устойчивости кластера выражается оптимальным балансом различных составляющих подсистем. Устойчивость развития кластера отражается системой показателей и может быть представлена в следующем виде:

$$Y_{Kл} = f(V, I, O, Ч, З_{И}, K_{ТУ}, T_{ц}, C, R, O_{Б}, \dots), \quad (1)$$

где  $V$  – объем выпускаемой продукции кластера по отраслям;  $I$  – объем инвестиций в кластерную структуру (на развитие инфраструктуры, приобретение нематериальных активов, на инновации);  $O$  – процент обновления основных производственных фондов участников кластера;  $Ч$  – численность предпринимательских структур кластера;  $З_{И}$  – затраты на технологические инновации;  $K_{ТУ}$  – коэффициент прироста технологий V и VI технологического уклада;  $S$  – себестоимость продукции, руб.;  $T_{ц}$  – длительность производственного цикла, дни;  $C$  – валовая прибыль кластера, руб.;  $R$  – совокупная рентабельность кластера;  $O_{Б}$  – доля работников кластера со средним и высшим профессиональным образованием и др.

Интегральный показатель оценки устойчивости развития кластера можно определить по следующей формуле:

$$Y_{Kл}^{\text{факт}} = \sum_{i=1}^n Y_{Kлi}^n k_i, \quad (2)$$

где  $Y_{Kлi}^n$  – нормированное значение  $i$ -го оценочного показателя, влияющего на устойчивое развитие кластера;  $k_i$  – вес (значимость)  $i$ -го оценочного показателя на интегральный показатель устойчивого развития кластера (определяется экспертным путем в интервале от 0 до 1).

При попадании интегрального показателя устойчивости кластера в диапазон от 0,8 до 1,0 – развитие кластера считается устойчивым. Отклонение интегрального показателя или хотя бы одного параметра от нормированных значений, требует перевода кластера из одного режима в другой. Например, от самоорганизации в режим управления для того чтобы провести системный анализ причин отклонений параметров развития от заданного уровня, и продумать мероприятия по их устранению.

Для каждого оценочного показателя определяется его нормированное значение:

$$Y_{Kli}^n = \frac{Y_{Kli}^{\text{факт}}}{Y_{Kli}^{\text{нор(план)}}} \quad (3)$$

где  $Y_{Kli}^{\text{факт}}$  – фактическое значение  $i$ -го оценочного показателя, влияющего на устойчивое развитие кластера (в принятых единицах измерениях);  $Y_{Kli}^{\text{нор(план)}}$  – нормативное (плановое) значение  $i$ -го оценочного показателя влияющего на устойчивое развитие кластера (в принятых единицах измерениях).

Величина отклонения интегрального показателя, определяется следующим образом:

$$Y_{Kl}^{\sum \text{нор}} - Y_{Kl}^{\sum \text{факт}} = \pm \Delta Y_{Kl}^{\sum \text{факт}} \quad (4)$$

Если отклонение является величиной положительной, то кластер может оставаться в режиме самоорганизации, если отрицательной, то кластер переводится в режим управленческого воздействия.

Оценка устойчивого развития по частным показателям определяются по выражению:

$$Y_{Kli} = Y_i^D - Y_i^H, \quad (5)$$

где  $Y_{Kli}$  – целевой, частный  $i$ -ый показатель устойчивого развития ПС;  $Y_i^D$  – достигнутое (фактическое) значение  $i$ -го целевого показателя оценки устойчивого развития кластера;  $Y_i^H$  – желаемое значение  $i$ -го целевого показателя оценки устойчивого развития кластера.

По каждому  $i$ -му целевому параметру порядка экспертным путем устанавливается величина максимально допустимого отклонения –  $\Delta Y_{Kli} \text{ max}$ , индивидуальная для каждого кластера. При достижении величины максимального отклонения, кластер переводится в режим управленческого воздействия (проведение системного анализа и принятие мер по ликвидации отклонения).

Таким образом, можно утверждать, что устойчивость развития рассматривается не только как результат деятельности, но и как возможность его обеспечения на основе взаимодействия механизмов управления и самоорганизации, а также как процесс формирования определенных характеристик.

### Заключение

В ходе проведенного исследования были изучены зарубежный и отечественный подходы к формированию и развитию кластерных структур, выявлены организационно-управленческие проблемы, с которыми могут столкнуться российские кластеры. Изучены современные подходы к обеспечению устойчивого развития экономики, и на их основе предложен и обоснован новый подход к формированию и развитию кластеров на основе замещения технологического уклада в экономике.

Главным достоинством исследования является разработанный авторский метод определения пропорций и взаимодействия механизмов организации, самоорганизации и управления в системе гармонического развития кластеров, а также организационные модели взаимодействия механизмов и процессов организации, самоорганизации и управления.

Преимуществами предложенного метода является: обеспечение закономерной, объективной цикличности взаимодействия механизмов управления и самоорганизации; восприятие места управленческого воздействия, как точки роста в производственном процессе кластерной структуры, так как оно всегда направлено на улучшение параметров развития как самого кластера, так и его участников по отдельности; создание синергетического эффекта посредством мягкого резонансного управления.

Преимуществом предложенной организационной модели взаимодействия механизмов и процессов организации, самоорганизации и управления является то что, они ориентированы, во-первых, на самообновление внутрисистемных связей кластера и, во-вторых, на гарантированное экономическое развитие. Традиционные же управленческие теории

описывают, как правило, способы сохранения организационного порядка, а также внутреннего и внешнего равновесия.

Разработанные модели взаимодействия механизма и процессов управления и самоорганизации можно считать актуальными.

### Публикации

1. *Борисова И.А.* Изменение управленческой парадигмы и формирование обучающейся организации // Труды гуманитарного факультета СПбГУ ИТМО: В 2 т. Т. 2. СПб., 2009. С. 29–33.
2. *Борисова И.А.* Анализ существующей теории и практики построения кластера // Труды гуманитарного факультета СПбГУ ИТМО: В 2 т. Т. 2. СПб., 2009. С. 33–41.
3. *Борисова И.А.* Концепция и методы обеспечения устойчивого развития кластеров на основе взаимодействия механизмов управления и самоорганизации // Проблемы и пути развития предпринимательской деятельности в современных условиях: Мат-лы VIII межвуз. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и докторантов (9–10 апреля 2010 г.). СПб., 2010. С. 210–211.
4. *Борисова И.А.* Применение синергетического подхода к оценке эффективности функционирования кластера (на основе взаимодействия механизма управления и самоорганизации) // Труды гуманитарного факультета СПбГУ ИТМО: Сб. научных статей. СПб., 2010. С. 47–52.
5. *Борисова И.А.* Алгоритм создания экономических кластеров // Партнерство бизнеса и образования в инновационном развитии региона: Сб. научных трудов IX Международной научно-практической конференции (28 октября 2010 г.). Тверь, 2010. С. 44–48.
6. *Борисова И.А.* Исследование влияние факторов внешней и внутренней среды на устойчивое развитие кластеров // Труды гуманитарного факультета СПбГУ ИТМО: Сб. научных статей. СПб., 2011. С. 57–65.
7. *Борисова И.А.* Анализ понятия и основных типов развития экономических кластеров // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Вып. 3. Труды молодых ученых. СПб., 2012. С. 111–113.
8. *Борисова И.А.* Новые подходы и методы обеспечения устойчивого функционирования и развития кластеров // Труды гуманитарного факультета СПбНИУ ИТМО: Сб. научных статей. СПб., 2012. С. 32–38.
9. *Борисова И.А.* Кластерная форма организации – основа инновационного развития экономики // Труды гуманитарного факультета СПбНИУ ИТМО: Сб. научных статей. СПб., 2012. С. 141–147.
10. *Борисова И.А.* Замещение технологического уклада – основа инновационного развития кластеров // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/107-8308>
11. *Борисова И.А.* Анализ проблем и пути развития кластерных структур // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2013. С. 98–99.
12. *Борисова И.А.* Новые подходы и методы обеспечения устойчивого развития кластеров // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/109-9375> .
13. *Борисова И.А.* Принципы организации и управления в кластерных структурах // Труды гуманитарного факультета СПбНИУ ИТМО: Сборник научных статей. Отв. ред. проф. В.И. Подлесных. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 142 с, С. 17–23.

### Литература

1. *Бедный А.Б., Колесников Д.С., Куфтырев И.Г. и др.* Организация инновационной деятельности в университетах США // Сб. информационно-аналитических материалов. Нижний Новгород, 2011. С. 4–19.
2. Обзор инновационных кластеров в иностранных государствах (Минэкономразвития России, май 2011 г.).

3. Сутырин С.Ф., Филиппов П.Н. Кластеры конкурентоспособности Финляндии // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2004. Сер. 5. Вып. 1 (№ 5). С. 71–78.
4. Материалы Минэкономразвития России по конкурсу инновационных территориальных кластеров: Объявление о конкурсе, порядок формирования перечня, критерии отбора, методические материалы по разработке программы развития, паспорт программы развития инновационного территориального кластера:  
[http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc20120619\\_03](http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/politic/doc20120619_03).
5. Материалы сайта «Российская кластерная обсерватория»: <http://cluster.hse.ru>.
6. Сайт Общественной организации «Союз промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга» (ОО СПП СПб): <http://www.spp.spb.ru/node/464>.
7. Глазьев С.Ю. Модернизация российской экономики на основе нового технологического уклада как ключевое направление антикризисной политики // Доклад на мировом общественном форуме «Диалог с цивилизацией» (11–13 июля 2010 г., Пекин, КНР).
8. Теория организации: Учеб. пособие / Под ред. проф. В.И. Подлесных. 3-е изд., испр. и доп. М., 2012. – 304 с.
9. Руководство по формированию кластеров – основные направления формирования и управления кластерными инициативами // Внутриевропейская Связь Кластеров. Перевод МИГСУ РАГС при Президенте РФ. С. 11.
10. Кобозев В.И. Исследование в области термодинамики процессов информации и мышления. М., 1971. – 195 с.



**Булгакова Вера Геннадьевна**  
**Факультет фотоники и оптоинформатики**  
**Кафедра инженерной фотоники**  
**E-mail: vera-bulgakova@yandex.ru**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЯХ**

В.Г. Булгакова

Научный руководитель – доцент Н.Д. Ворзобова

### **Введение**

Периодические структуры с размерами элементов соизмеримыми с длиной волны света могут использоваться в качестве элементов управления световыми пучками, узкополосных фильтров, фотонных кристаллов, брэгговских структур, дифракционных оптических элементов. В настоящее время существует ряд способов синтеза таких структур. Одним из наиболее перспективных является метод интерференционной литографии (interference lithography или holographic lithography) [1]. Отображение световой интерференционной структуры в объеме материала определяется свойствами материала и процессом получения структуры. Однако создание макроскопически однородных, бездефектных структур до сих пор представляется весьма сложной технической задачей.

В настоящее время интерференционные методы реализуются с использованием различных типов фоторезистов, в том числе негативного фоторезиста SU-8 [2, 3]. Процессы получения объемных структур в таких материалах сопряжены с необходимостью трудоемких операций термической и химической обработки. Исключение данной проблемы возможно при использовании светоотверждаемых композиционных материалов на основе акриловых мономеров и нанокмпозитов, разрабатываемых на кафедре [4] и позволяющих наносить

полимерные слои с большой толщиной (десятки и сотни микрон) без использования растворителя.

Композиционные материалы, на которые ориентирована работа, являются фотополимеризующимися. Их структуры формируются в результате фотоотверждения, что обеспечивает большие скорости формирования и снижает трудоемкость процессов. Ранее такие материалы использовались для формирования микроэлементов на торце оптоволокна [5] – микролинз – методом тоновой литографии, микроструктурных элементов с высоким форматным отношением методом глубокой литографии [6]. Дифракционные и селективные свойства структур в данных материалах определяются формируемой модуляцией показателя преломления. Особый интерес представляют композиции с введением наночастиц [7]. Механизмы формирования структур в таких системах определяются взаимодиффузией компонент композиции в интерференционном поле, которая связана как со свойствами самих компонент, так и с характеристиками поля, и являются предметом широких научных исследований.

### Цель и задачи проекта

Цель научного проекта – исследование процесса формирования структур в нанокomпозиционных материалах на основе акриловых мономеров в интерференционных световых полях и основных механизмов, определяющих дифракционные и размерные характеристики структур.

Задачи проекта включают в себя:

1. Исследование кинетики интерференционной записи в нанокomпозиционных материалах, ее связи с составом композиций, характеристиками наложенного светового поля (частотой интерференционной картины, длиной волны излучения) и толщиной полимеризуемого слоя.

2. Исследование механизмов и процессов, определяющих величины дифракционной эффективности периодических структур и модуляции показателя преломления. Определение возможных путей улучшения характеристик получаемых структур.

3. Определение свето- и термостойкости получаемых структур.

4. Получение образцов структур различной конфигурации с высокими дифракционными характеристиками.

### Методы исследования

Для формирования структур использовался интерференционный метод. Суть его заключается в том, что на поверхность материала проектируется интерференционная картина, получаемая в результате наложения двух и более когерентных волн. Формирование структуры происходит за счет неоднородной полимеризации светочувствительного материала и фотостимулированного перемещения его компонент, что приводит к модуляции показателя преломления. Введение наночастиц, показатель преломления которых существенно отличается от показателя преломления полимерной матрицы, существенно увеличивает модуляцию показателя преломления при фотоиндуцированном перемещении компонент в материале. На рис. 1. представлена схема процесса перемещения наночастиц в процессе интерференционной записи [7].

В ходе работы методом двухлучевой интерференционной литографии были получены периодические структуры. Для исследования их параметров использовались методы оптической микроскопии (оптический измерительный микроскоп OLYMPUS STM6). Для исследования процессов диффузионного массопереноса использовался метод атомно-силовой микроскопии (исследования с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) проводились в Университете города Дебрецен, Венгрия) в сочетании с методами плазмохимического травления для удаления верхнего слоя полимера. Кроме того, использовался дифракционный метод. Измерялась дифракционная эффективность структур на длине волны 633 нм, определяемая отношением интенсивности излучения в первом порядке дифракции к интенсивности падающего излучения, и величина светорассеяния, определяемая

отношением интенсивности ореола рассеяния к интенсивности падающего излучения. Возможность использования длины волны 633 нм определяется отсутствием поглощения на ней полимерных слоев.

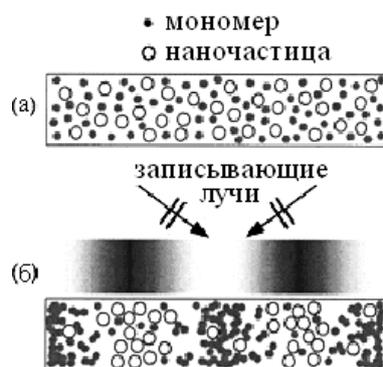


Рис. 1. Процесс перемещения наночастиц в интерференционном поле

### Процесс получения периодических структур

Для реализации интерференционного метода создана экспериментальная установка (рис. 2.) с использованием He-Cd лазера с выделением длины волны 325 или 442 нм, что связано с полосами поглощения используемых инициаторов фотополимеризации. При создании установки обеспечены следующие требования:

- наименьшие энергетические потери, достигаемые использованием оптических элементов с наибольшим пропусканием и отражением на рабочих длинах волн;
- совмещение интерферирующих пучков в плоскости регистрирующего слоя;
- равенство интенсивностей интерферирующих пучков и оптических путей в плечах схемы записи;
- возможность изменения угла между интерферирующими пучками.

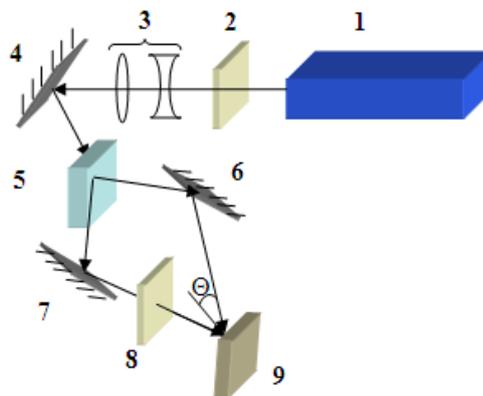


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – гелий-кадмиевый лазер; 2 и 8 – светофильтры; 3 – телескоп; 4, 6 и 7 – зеркала; 5 – кварцевый клин; 9 – светоотверждаемый материал

Для получения структур с различным периодом угол между интерферирующими пучками изменялся. Большинство экспериментов проведено при величине угла в  $10^\circ$  (период микроструктуры 2 мкм для длины волны 325 нм) с целью возможного использования оптических методов для оценки качества структур.

Процесс получения периодических структур методом интерференционной литографии состоит из трех стадий: нанесение полимеризуемого слоя, экспонирование и равномерная засветка образца УФ-излучением. Для нанесения слоев используется следующий метод (рис. 3а): капля жидкой композиции наносится на стеклянную подложку, толщина полимеризуемого слоя задается толщиной спайсеров и формируется при механическом давлении. В большинстве экспериментов задавалась толщина слоя в 20 мкм. Были также проведены эксперименты для толщин 5, 20, 40, 100 и 300 мкм.

С целью исключения ингибирования процесса фотополимеризации кислородом воздуха слои защищались пленкой из полиэстера с коэффициентом пропускания 0,5 на длине волны 325 нм и прозрачной для длины волны 442 нм. Подготовленный образец освещался двумя пучками излучения He-Cd лазера.

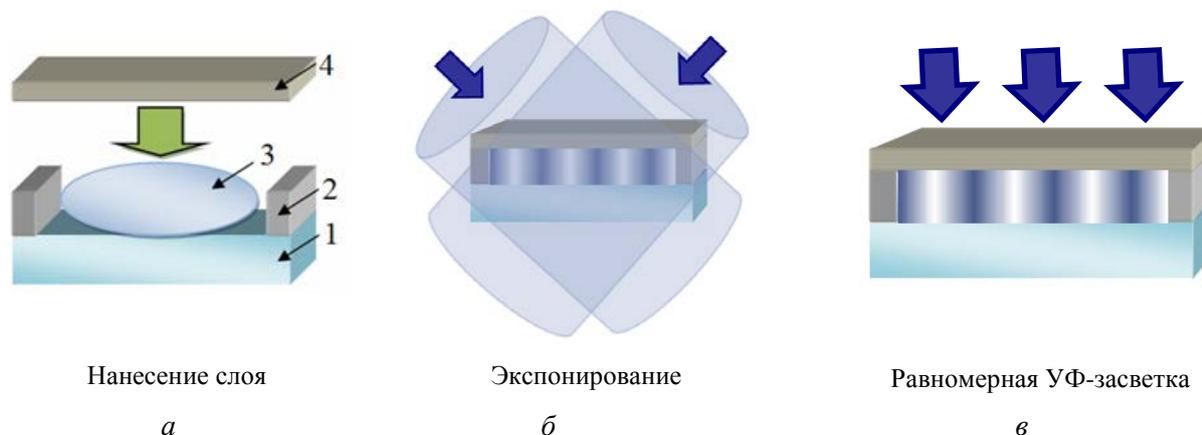


Рис. 3. Стадии получения периодической структуры методом интерференционной литографии: 1 – стеклянная подложка; 2 – спайсеры; 3 – мономерная композиция; 4 – защитная пленка

Под действием излучения материал полимеризуется, при этом формируется модуляция показателя преломления, отображающая распределение интенсивности в интерференционной картине (рис. 3б). Затем проводится равномерная засветка образцов УФ-излучением для полимеризации неотвержденного материала и для определения светостойкости (рис. 3в). Для исследования термостойкости полученных структур осуществлялся нагрев образцов до 50 и 150 °С.

### Используемые материалы

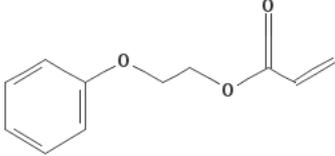
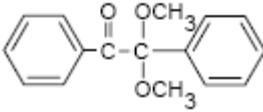
Для реализации интерференционного метода использовались различные мономерные композиции, а также нанокомпозиты с введением наночастиц ZnO и SiO<sub>2</sub>. Исследуемые светочувствительные композиции включали в себя смесь мономеров, инициатор фотополимеризации для определенной спектральной области (325 и 442 нм) и наночастицы. Используемые компоненты и их соотношение в исследуемых композициях приведены в Табл. 1.

Изменение соотношения концентраций акрилатов и диакрилатов (2Carb, BisA, PEA) в мономерной композиции определяет оптические, химические и физические свойства материала. Наночастицы ZnO (20 нм) и SiO<sub>2</sub> (14 нм) увеличивают вязкость композиции, а также повышают (ZnO) или понижают (SiO<sub>2</sub>) показатель преломления, при этом полимерный композит остается прозрачным в УФ и видимой областях спектра.

Таблица 1

Используемые компоненты композиций

№	Название	Производитель	Показатель преломления	Химическая формула	Сокращенное название
1	2-carboxyethyl acrylate	Aldrich, № 552348	1,4570	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OCH}_2\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$	2Carb
2	Bisphenol A glycerolate	Aldrich, № 41,116-7	1,557		BisA

№	Название	Производитель	Показатель преломления	Химическая формула	Сокращенное название
3	Phenoxyethyl acrylate	Aldrich, № 408336	1,518		PEA
4	Наночастицы	Красный химик	1,9	ZnO (20 нм)	-
5	Наночастицы	Aldrich	1,46	SiO <sub>2</sub> (14 нм)	-
6	Диметокси-фенилацето-фенон (325 нм)	Aldrich	-		InII
7	бис (5-2,4-иклопентадиенил) бис [2,-дифторо-3-(1Н-пирролил) фенил] титан Irgacure 784 (442 нм)	Aldrich	-	-	Irg

### Основные достигнутые результаты

В результате выполнения научного проекта исследован процесс формирования периодических структур при изменении состава композиций, характеристик наложенного интерференционного поля, экспозиционных параметров и постэкспозиционной обработки.

### Влияние введения наночастиц в полимерную матрицу на дифракционные характеристики периодических структур

Проведено сравнение дифракционных характеристик для композиций при введении наночастиц оксида цинка и ненаполненной композиции. На рис. 4. представлены дифракционные характеристики трехкомпонентной мономерной композиции.

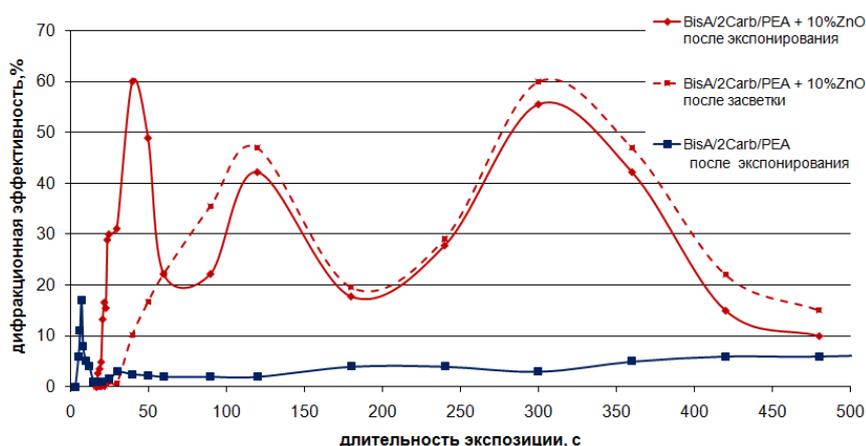


Рис. 4. Дифракционные характеристики периодических структур для мономерной композиции и нанокompозита: длина волны 325 нм, период 2 мкм, толщина слоя 20 мкм

Видно преимущество характеристик нанокompозита по сравнению с ненаполненной композицией. Как отмечалось ранее, это связано с фотоиндуцированным перемещением наночастиц и получением большей модуляции показателя преломления, так как показатель преломления наночастицы оксида цинка значительно выше, чем матрицы (Табл. 1).

АСМ-фотография поверхности периодической структуры после промывания в спирте приведена на рис. 5.

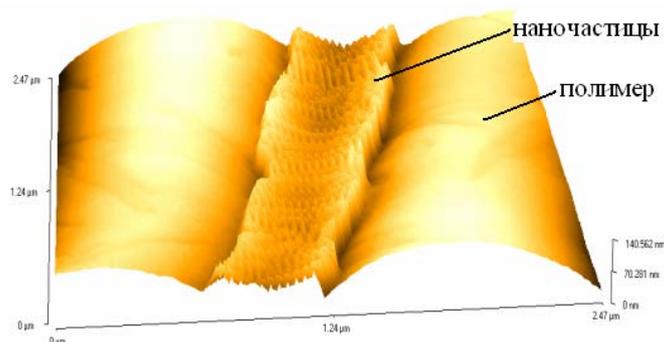


Рис. 5. АСМ-изображение периодической структуры после обработки в изопропиловом спирте: композиция BisA/2Carb/PEA, ZnO 10 %, период 2 мкм, длина волны записи 325 нм (изображение получено в Университете г. Дебрецен. Венгрия)

При промывании в изопропиловом спирте недополимеризованный компонент растворяется и наночастицы, которые переместились в темную область, где полимеризация прошла не полностью, становятся видимыми. Здесь отчетливо видны области полимеризации (в светлых областях интерференционного поля) и области, в которые переместились практически все наночастицы (темные области интерференционного поля). На рис. 5 показано влияние постэкспозиционной равномерной засветки УФ-излучением на дифракционные характеристики структур. Как видно, равномерная засветка снижает дифракционную эффективность в области малых экспозиций (до 50 с). Это может быть связано с полимеризацией неотвержденного мономера, приводящей к увеличению показателя преломления, но при этом уменьшается разница показателей преломления в освещенной и неосвещенной областях (модуляция показателя преломления). При больших экспозициях засветка практически не влияет на дифракционную эффективность.

### Влияние состава мономерной матрицы на дифракционные характеристики

Для расширения области спектральной чувствительности были изготовлены нанокomпозиционные материалы, чувствительные к излучению 442 нм. В ходе работы было исследовано влияние состава мономерной композиции на дифракционную эффективность периодических структур. Сравнение дифракционных характеристик для двух и трехкомпонентных нанокomпозитов представлено на рис. 6.

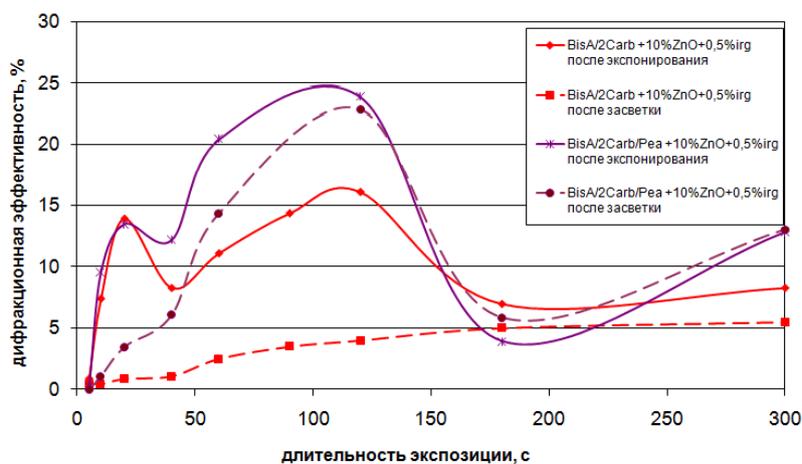


Рис. 6. Дифракционные характеристики структур для двух- (BisA/Carb 3/7) и трехкомпонентного нанокomпозита (BisA/Carb/PEA 25/55/20): инициатор – Irgacure 784, концентрация – 0,5 вес. %, длина волны 442 нм, период 2,7 мкм

Видно, что структуры, полученные на материале 2Carb/BisA/PEA(55/25/20) +10 %ZnO (кривые, отмеченные фиолетовым цветом), обладают большей дифракционной

эффективностью по сравнению со структурами, полученными на композиции 2Carb/BisA(70/30)+10%ZnO. Это может быть связано с тем, что компонента PEA имеет короткую молекулярную цепь, что позволяет увеличить диффузию наночастиц в мономерной матрице. Она также имеет меньший показатель преломления по сравнению с 2Carb и BisA, что позволяет увеличить модуляцию показателя преломления в формируемой структуре и, следовательно, дифракционную эффективность. Из рисунка видно, что величина дифракционной эффективности при больших длительностях экспозиции не изменяется после равномерной засветки образца УФ-излучением (пунктирные кривые), что позволяет исключить процесс химической обработки в изопропиловом спирте при больших экспозициях.

### Запись периодических структур при увеличении частоты

Исследовалась возможность записи периодических структур при увеличении частоты (для угла между интерферирующими пучками  $25^\circ$ ), что соответствует по условию Брэгга, периоду структуры 0,8 мкм и размеру элемента структур порядка 400 нм (рис. 7).

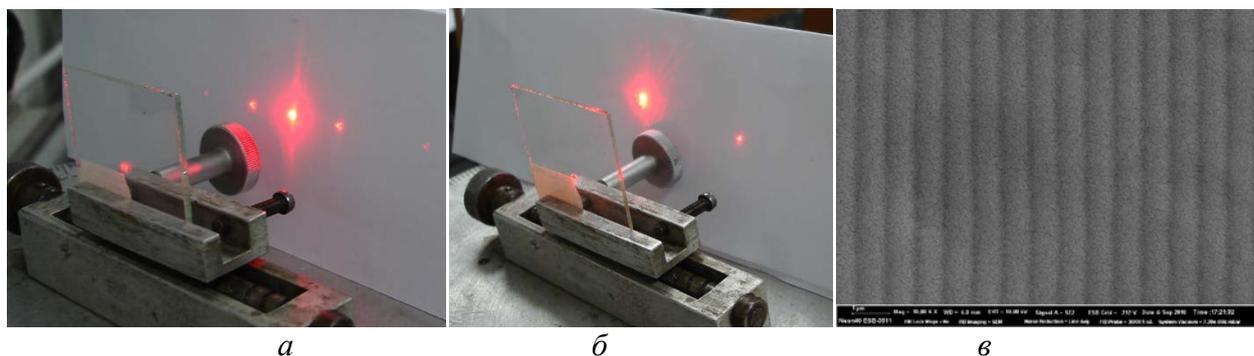


Рис. 7. Картины дифракции на структурах с периодом: а – 2 мкм и б – 0,8 мкм, а также фотография структуры с размером элементов 400 нм, полученная методом электронной сканирующей микроскопии – в

Зависимость дифракционной эффективности структуры от частоты наложенной интерференционной картины представлена на рис. 8.

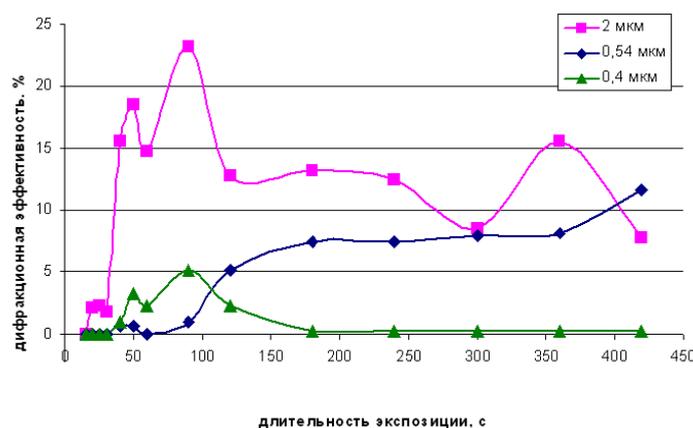


Рис. 8. Дифракционная эффективность структур с различным периодом: нанокompозит BisA/2Carb 3/7 + 10%ZnO, длина волны 325 нм, толщина слоя 20 мкм

Получены образцы структур на различных композициях. Для них, в отличие от структур с периодом 2 мкм (рис. 7), установлено существенное увеличение угловой селективности и наличие одного порядка дифракции.

### Изменение толщины полимерного слоя

Исследована зависимость дифракционных характеристик при изменении толщины полимерного слоя от 20 до 300 мкм. На рис. 9 представлены зависимости максимальных значений дифракционной эффективности структур (после экспонирования), полученных при записи на длине волны 442 нм на нанокompозитах с наночастицами ZnO и SiO<sub>2</sub>.

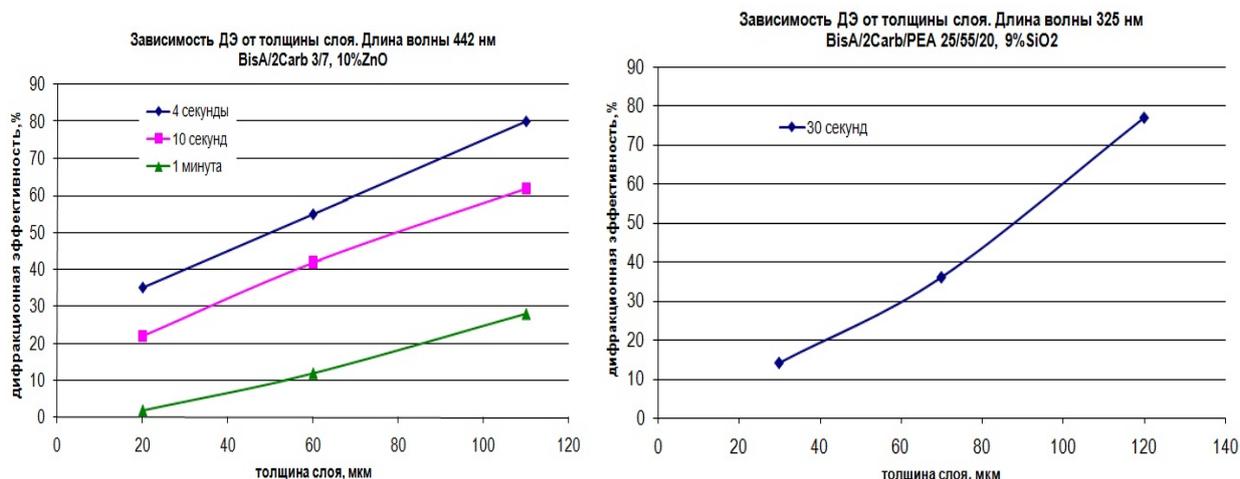


Рис. 9. Зависимость дифракционной эффективности от толщины полимерного слоя. Период структур 3 мкм

Для исследованных композиций установлено увеличение дифракционной эффективности при увеличении толщины слоя от 20 до 100–120 мкм. При дальнейшем увеличении толщины наблюдается увеличение светорассеяния.

### Самоорганизация наночастиц в процессе голографической записи

В результате выполнения проекта был исследован механизм формирования структур на основе нанокompозита в процессе голографической записи. На рис. 10 показана кинетика формирования рельефа.

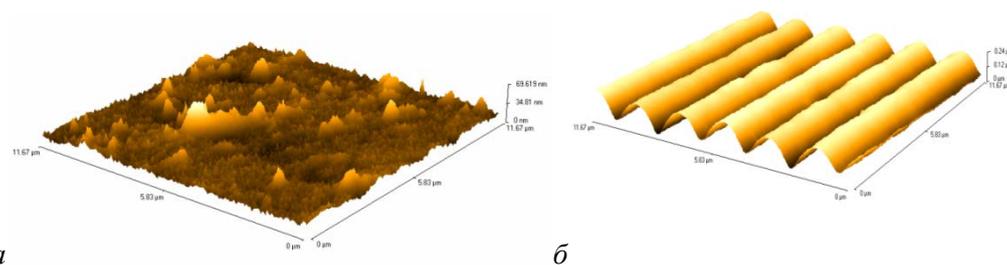


Рис. 10. АСМ-фотографии поверхности нанокompозита BisA/2Carb/PEA, ZnO 10 %: а – длительность экспозиции 3 мин; б – 6 мин (изображения получены в Университете г. Дебрецен. Венгрия)

При длительности экспонирования 6 мин поверхность нанокompозита приобретает волнообразный вид, который характерен для перетекания компонент внутри композиции. Для исследования внутренней структуры образцы подвергались плазмо-химическому травлению для удаления верхнего полимерного слоя. Микрофотографии полученных структур, выполненные на атомно-силовом микроскопе, приведены на рис. 11.

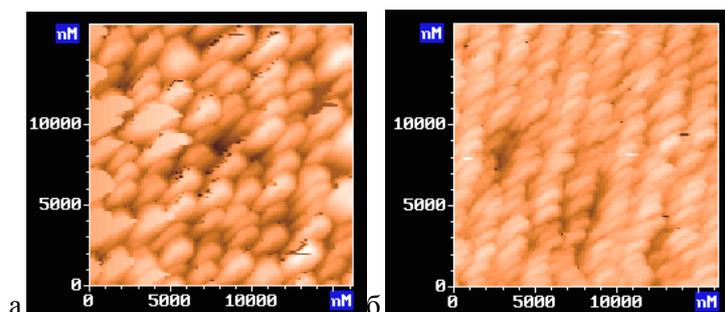


Рис. 11. АСМ-фотографии нанокompозита после удаления верхнего слоя плазмо-химическим травлением: а – после равномерной засветки; б – после голографической записи

На фотографиях видно, что при равномерной засветке наночастицы распределены равномерно, а при голографической записи – периодически упорядочены.

### Влияние постэкспозиционной обработки на дифракционные характеристики

В работе исследовалась термостабильность полученных периодических структур. Для этого образцы выдерживались при температуре 50 °С полтора часа и затем при температуре 150 °С в течение 5 мин. Зависимость дифракционной эффективности от термической обработки приведена в Табл. 2.

Таблица 2

Зависимость дифракционной эффективности структур от температуры нагрева

	экспонирование	50 °С, 1,5 ч	150 °С, 5 мин
BisA/2Carb/PEA (25/55/20) + 10 % ZnO +0,5 % inII	25 %	15 %	3 %
BisA/2Carb/PEA (25/55/20) + 9 % SiO <sub>2</sub> +0,5 % inII	15 %	15 %	13 %
BisA/2Carb (3/7) + 6 % SiO <sub>2</sub> + 0,5 % inII	17 %	16 %	14 %

Материал с наночастицами SiO<sub>2</sub> обладает лучшей термостабильностью по сравнению с наноккомпозитом на основе ZnO. На рис. 12 представлены АСМ-фотографии периодических структур на основе наноккомпозитов с наночастицами оксида цинка и оксида кремния после плазмо-химического травления до и после нагрева образцов.

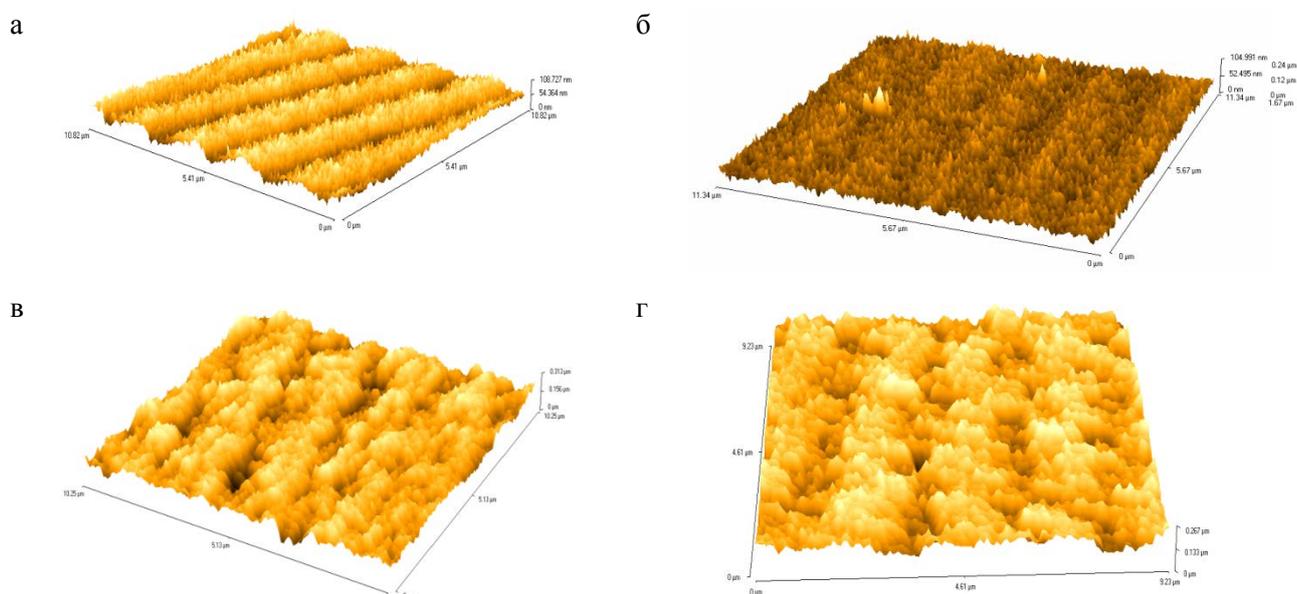


Рис. 12. АСМ-фотографии периодических структур после плазмо-химического травления на основе наноккомпозита: а, б – BisA/2Carb/PEA+10 %ZnO; в, г – BisA/2Carb+ 6 %SiO<sub>2</sub>; а, в – до нагрева, б, г – после

На фотографиях видно, что после нагрева в случае наноккомпозита на основе наночастиц оксида цинка распределение наночастиц практически равномерно. Для наноккомпозита на основе оксида кремния картина не меняется. Это может быть связано с тем, что наночастицы оксида кремния имеют больший размер, что затрудняет их диффузию в полимерной матрице.

### Области возможного использования результатов проекта

Полимерные периодические структуры могут применяться в качестве фотонных кристаллов; в системах телекоммуникации; лазерной технике в качестве элементов управления характеристиками излучения; элементов микролазеров, совмещающих функции активных элементов и резонаторов; дифракционных оптических элементов; узкополосных спектральных фильтров [8], а также в защитных технологиях персонализации документов и защиты ценных бумаг и банкнот.

Результаты проекта определяют возможность расширения областей использования гибридных материалов на основе наночастиц, внедренных в полимерную матрицу. Интерес

к таким материалам связан с тем, что они сочетают преимущества полимерных сред со специфическими свойствами введенных наночастиц. Результаты работы показали возможность использования исследованных материалов в качестве голографических сред. Полученные структуры применимы для широкого спектра излучения, поскольку используемые материалы (смеси акриловых мономеров) прозрачны в области ближнего УФ, видимой области и ближней ИК-области спектра. Еще одним преимуществом метода получения полимерных структур, а также оптических элементов на их основе и содержащих нанокомпозиты, является возможность изменения их физических и оптических свойств – показателя преломления, твердости и рассеяния.

Результаты работы использованы для получения голографических элементов применительно к защитным технологиям и технологиям получения узкополосных фильтров на оптоволокне (рис. 13).

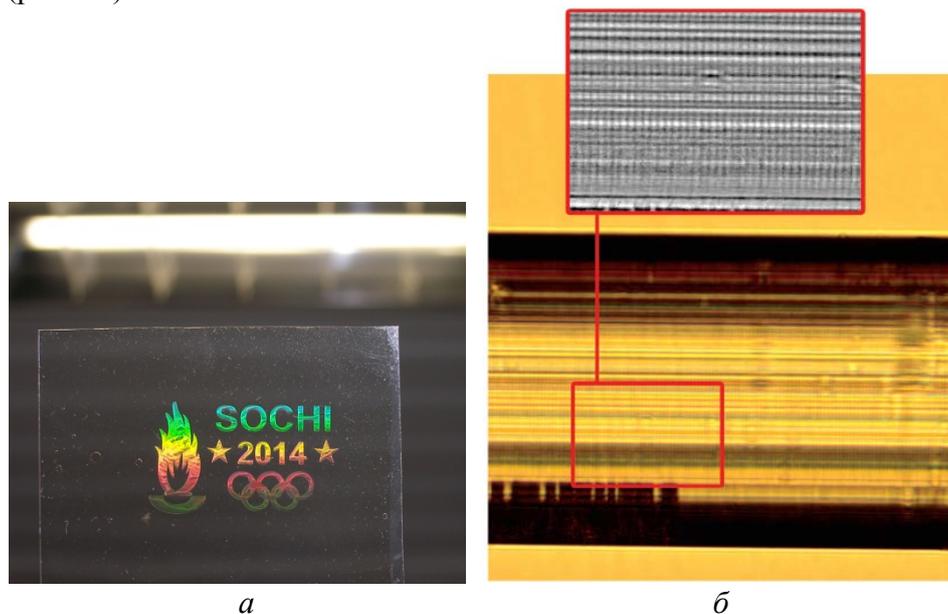


Рис. 13. Примеры голографических элементов: а – защитный элемент на основе объемной пропускающей дифракционной решетки; б – периодическая структура в оптоволокне

### Заключение

В результате проведения научного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Определен характер зависимости дифракционных характеристик периодических структур от состава композиций на основе акриловых мономеров с наночастицами оксида цинка и оксида кремния, а также параметров записи – длины волны, частоты, длительности экспозиции, толщины полимерного слоя.

2. Определены условия получения структур с дифракционной эффективностью до 60 % при толщине слоя 20–30 мкм и возможность увеличения дифракционной эффективности до 80 % при увеличении толщины слоя и уменьшении частоты записи.

3. Исследовано влияние последующей засветки и высокотемпературной обработки на дифракционную эффективность. Установлено преимущество нанокомпозитов с оксидом кремния.

4. Результаты работы позволили получить новые представления о процессах фотоиндуцированной самоорганизации и механизмах формирования объемных субмикронных и наноразмерных периодических структур в нанокомпозиционных светоотверждаемых материалах.

## Публикации

1. *Vorzobova N.D., Bulgakova V.G., Burunkova Yu.E.* Размерные характеристики полимерных микроструктур при УФ-отверждении нанокompозита // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 10. С. 72–77.
2. *Vorzobova N.D., Bulgakova V.G., Kalinina N.M., Burunkova Yu.E.* Regularities in the formation of microstructural elements in a light-curable nanocomposite // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2011. Vol. 536. P. 50 / [282]–57 / [289].
3. *Vorzobova N.D., Burunkova Yu.E., Bulgakova V.G., Denisjuk I.Yu., Kalinina N.M.* Получение полимерных периодических структур в УФ-отверждаемых композиционных материалах методом лазерной интерференционной литографии // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2011. Т. 54. № 12. С. 62–67.
4. *Vorzobova N.D., Bulgakova V.G., Burunkova Yu.E., Moskalenko A.I.* The process of periodic structures fabrication in photocurable composite materials // *Physics and Chemistry of Solid State*. 2012. Vol. 13. No 1. P. 265–268.
5. *Burunkova J.A., Denisjuk I.Yu., Bulgakova V., Kokenyesi S.* TiO<sub>2</sub>-acrylate nanocomposites elaborated by UV-curing with tunable properties // *Solid State Phenomena*. 2013. Vol. 200. P. 173–177.
6. *Denisjuk I.Yu., Burunkova Yu.E., Tibilov A.S., Семьина С.А., Булгакова В.Г.* Оптический узкополосный фильтр на основе брэгговской решетки, записанной в полимер-наполненном микроканальном волноводе // *Оптический журнал*. 2013. № 3. С. 87–91.
7. *Denisjuk I.Yu., Burunkova Ju.A., Kokenyesi S., Bulgakova V.G., Fokina M.I.* Optical nanocomposites based on high nanoparticles concentration and its holographic application // *Sudheer Neralla (ed.). Nanocrystals – Synthesis, Characterization and Applications*. Croatia, 2012. P. 81–102.

## Литература

1. *Ramanan V., Nelson E., Brzezinski A. et al.* Three dimensional silicon-air photonic crystals with controlled defects using interference lithography // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92. P. 173304 (1–3).
2. *Shen X.X., Yu X.Q., Yang X.L. et al.* Fabrication of periodic microstructures by holographic photopolymerization with a low-power continuous-wave laser of 532nm // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2006. Vol. 8. P. 672–676.
3. *Kondo T., Juodkazis S., Mizeikis V. et al.* Fabrication of three-dimensional periodic microstructures in photoresist SU-8 by phase-controlled holographic lithography // *New Journal of Physics*. 2006. Vol. 8. P. 250.
4. *Бурункова Ю.Э., Семьина С.А., Капорский Л.Н., Левичев В.В.* Наномодифицированные оптические акрилатные композиты // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 10. С. 54–57.
5. *Фокина М.И., Денисюк И.Ю.* Формирование решеток микролинз методом дозированной фотополимеризации УФ-отверждаемых оптических композитов // *Оптический журнал*. 2006. № 11. С. 90–96.
6. *Denisjuk I.Yu., Fokina M.I., Vorzobova N.D. et al.* Microelements with high aspect ratio prepared by self-focusing of the light at UV-curing // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2008. Vol. 497. P. 228–235.
7. *Tomita Y., Suzuki N., Chikama K.* Holographic manipulation of nanoparticle distribution morphology in nanoparticle-dispersed photopolymers // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30. No 8. P. 839–841.
8. *Денисюк И.Ю., Бурункова Ю.Э., Тибилев А.С. и др.* Оптический узкополосный фильтр на основе брэгговской решетки, записанной в полимер-наполненном микроканальном волноводе // *Оптический журнал*. 2013. № 3. С. 87–91.



**Горячий Сергей Александрович**  
**Факультет экономики и экологического менеджмента (ИХиБТ)**  
**Кафедра экономической теории и экономической политики**  
**E-mail: trilon144@yandex.ru**

## **ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОЕ ПАРТНЕРСТВО КАК ИНСТРУМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В СФЕРЕ ЖКХ**

С.А. Горячий

Научный руководитель – профессор Н.А. Шапиро

### **Актуальность исследования**

Модернизация российской рыночной системы, нацеленная на достижение высоких результатов по обеспечению высокой конкурентоспособности страны, предполагает адаптацию известных форм и методов управления к особенностям российской практики.

Объектом данного исследования являются процессы управления государственной и муниципальной собственностью при реализации общественно значимых проектов. В таких проектах органы государственной власти и субъекты предпринимательской деятельности должны быть объединены стремлением достижения намеченной цели. Однако это сотрудничество должно быть еще и взаимовыгодным.

В последние десятилетия одним из главных механизмов повышения эффективности управления государственной и муниципальной собственностью становится государственно-частное партнерство (ГЧП), которое отражает сложные и многозначные процессы расширения и углубления сфер взаимодействия государства и бизнеса.

Анализ мировых хозяйственных практик позволяет утверждать, что современное хозяйственное партнерство государства и частного сектора – ГЧП (public-private partnership) – это институциональный и организационный альянс между государством и частным бизнесом. Создание такого альянса эффективно для реализации масштабных, национальных и международных, общественно-значимых проектов, в широком спектре сфер деятельности – от развития стратегически важных отраслей промышленности и НИОКР – до обеспечения общественных услуг [1].

Несмотря на активную практику и множество национальных моделей ГЧП, понятийно-категориальный аппарат теории все еще находится на стадии формирования. В сущности, отсутствует даже определение ГЧП, с которым бы соглашалось большинство авторов. Как правило, все определения ГЧП находятся в прямой зависимости от экономической модели, которую исповедует то или иное государство.

С методологической точки зрения современная теория ГЧП базируется на теории смешанной экономики, дополняя и развивая ее. Посредством ГЧП государство отказывается от неэффективных форм управления, принадлежащей ему собственности. Другой важной основой теории ГЧП является теория государственного регулирования экономики. Действительно трудно представить себе сколь-нибудь сложный проект затрагивающий интересы крупнейших экономических агентов, без необходимости эффективного государственного регулирования. Последним столпом, образующим фундамент теории ГЧП является теория общественного сектора экономики. В рамках данной теории ГЧП призвано смягчать последствия провалов рынка.

Актуальность исследования исходит из отсутствия концептуального осмысления как теоретических, так и практических аспектов различных форм ГЧП, несмотря на то, что само понятие «ГЧП» впервые прозвучало в современной России уже более десяти лет назад.

Актуальность исследования ГЧП в наиболее распространенной форме – концессии – определяется также тем, что вполне успешная историческая практика применения концессии в России, не получила удовлетворительного теоретического осмысления ни на одном

историческом этапе своего существования. В первом случае, – во второй половине XIX в. – этого не произошло, как представляется, из-за отсутствия научного интереса к данному явлению. Во втором, – в начале XX в. – из-за решительной смены идеологических и мировоззренческих приоритетов, тогда как начало теоретическому обоснованию в рамках концепции государственного капитализма было положено.

На сегодняшний день в мировой практике наиболее распространенной формой ГЧП является концессия. В ряде стран на нее приходится около 80 % партнерств. Концессии широко применяются в различных секторах экономики – от транспортной инфраструктуры до медицинских и образовательных учреждений. Однако наибольшая эффективность данного вида партнерств достигается в сфере генерации и дистрибуции воды, газа, электрической и тепловой энергии, то есть в отраслях, которые в российской практике обычно относят к сектору жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). На сегодняшний день данный сектор является, пожалуй, самым изношенным и технологически отсталым в российской экономике.

Объект исследования: процессы управления государственной и муниципальной собственностью при реализации общественно значимых проектов.

Предмет исследования: отношения государственно-частного партнерства (прежде всего в форме концессий) и их применение для структурных преобразований коммунального хозяйства на современном этапе модернизации экономики.

Цель исследования: теоретико-экономическое осмысление реальных практик ГЧП в проектах управления и модернизации сектора жилищно-коммунального хозяйства.

Достижению цели способствует решение следующих задач:

1. Историческая реконструкция представлений о роли и функциях государства в истории русской экономической и управленческой мысли. Решение данной исследовательской задачи имеет самостоятельную научную ценность, в виду крайне скудного количества работ по данной тематике, как в советской, так и в современной российской литературе. Вместе с тем следует отметить, что значение данного направления исследований постепенно находит отклик в европейской научной среде. Так можно выделить работу профессора Гамбургского университета Йоахима Цвайнерта «История экономической мысли в России. 1805–1905», удостоенной приза Европейского общества истории экономической мысли. В рамках данной части исследования предполагается рассмотреть ключевые проблемы государственного управления в Российской Империи (анализ работ С.А. Десницкого, Х. Шлёцера, Н.С. Мордвинова, А.И. Бутовского, С.Ю. Витте, П.А. Столыпина и др.), в Советской России (анализ концепций главкизма и демократического централизма, концепцию концессионного государственного капитализма В.И. Ленина, дискуссию о госплане между представителями телеологического и генетического направлений) и в современной России (концепция ГЧП).

2. Анализ теоретических основ экономики ЖКХ. Одним из ключевых вопросов, принятых для научного анализа, является правомерность существования термина «жилищно-коммунальное хозяйство» и необходимость выделения сферы генерации и дистрибуции воды, газа, электрической и тепловой энергии в самостоятельную отрасль.

3. Рассмотрение сферы коммунальных услуг в терминах новой институциональной теории, в частности с позиции контрактов. Анализ методов построения эффективной государственной политики в области ГЧП, определение сфер интересов государства и частного бизнеса и выявление площади их пересечения.

4. Разработка основ построения эффективной политики ГЧП для решения задач управления государственной и муниципальной собственностью при реализации общественно значимых проектов (прежде всего в секторе ЖКХ), особенно в условиях мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга).

Работа предполагает использование ряда таких методов как: абстрактно-теоретического, институционально-исторического, сравнительного институционального анализа, а также дескриптивно-эмпирического, статистического и др.

Научно-теоретической базой для исторической реконструкции представлений о роли и функциях государства в истории русской экономической мысли являются труды: В.А. Базарова, А.И. Бутовского, И.В. Вернадского, С.Ю. Витте, Н.Ф. Даниельсона,

С.Е. Десницкого, В.И. Ленина, Н.С. Мордвинова, В.В. Осинского (Оболенского), П.И. Пестеля, А.И. Рыкова, П.А. Столыпина, П.Б. Струве, С.Г. Струмилина, И.А. Третьякова, А.С. Хомякова, А.И. Чупрова, Х. Шлёцера, Г. Шторха и др.

Научно-методологической базой для теоретического исследования института ГЧП и его адаптации к российской хозяйственной действительности в рамках отрасли коммунального хозяйства являются труды: А. Бремзена, В.Г. Варнавского, С.М. Гуриева, Дж. Р. Коммонса, Р. Коуза, Дж. Малгана, Р.А. Познера, А.И. Попова, Р. Рихтера, А.Ф. Синяковой, С.А. Сосна, О. Уильямсона, Э.Г. Фуруботна, Н.А. Шапиро, Л.И. Юзвовича и др.

При проведении исследования также были использованы не переведенные на русский язык работы E. Auriol, P. Picard, E. Lobina, D. Hall и др.

Эмпирическую и статистическую базу исследования составляют отчеты о деятельности «Агентства по ипотечному жилищному кредитованию», Фонда содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства, Федерального фонда содействия развитию жилищного строительства, Инвестиционного фонда Российской Федерации, а также материалы Госстата и портала «государственно-частное партнерство».

## Основное содержание и выводы исследования

### Роль и функции государства в истории русской экономической мысли

Первыми российскими подданными, кто ознакомился с основами классического политэкономического учения, были, судя по всему, С.Е. Десницкий и И.А. Третьяков, студенты юридического факультета Московского университета. В 1761 г. они были направлены в Глазго для изучения юриспруденции, где в числе прочего слушали курс лекций Адама Смита, до того, как тот отправился в путешествие по Европе.

Непосредственное же академическое экономическое учение в России начинается с трудов Христиана фон Шлецера («Начальные основания государственного хозяйства» 1804–1807 гг.) и Генриха фон Шторха («Курс политической экономии» 1815 г.). Уже в этих работах, призванных дать русскую интерпретацию классического учения, отчетливо видна ключевая проблема государственного управления, которая неизменно оставалась в центре внимания интеллектуальной элиты страны вплоть до революции 1917 г. Она заключалась в выборе пути экономического развития и определении стратегической цели экономической политики государства.

Ключевая проблема выбора пути экономического развития сформировала следующие вопросы:

1. Должна ли Россия форсировать промышленную революцию и развитие капиталистических отношений?
2. Является ли крепостное хозяйство эффективным?
3. Является ли общинное землевладение эффективной формой организации сельского хозяйства?
4. Какова должна быть торговая политика России?

Все они тесно взаимосвязаны и так или иначе встречаются в трудах большинства крупнейших экономистов того времени. При рассмотрении вопроса о необходимости индустриализации Шлецер исходит из концепции стадий развития. Так, первой стадией развития является сельское хозяйство. Переход ко второй стадии, мануфактурному производству, осуществляется, согласно Шлецеру, только тогда, когда инвестиционные возможности в сельском хозяйстве исчерпываются. В виду наличия в России огромных территорий, потенциально пригодных для сельского хозяйства, Шлецер высказывался против форсирования индустриализации, утверждая, что Россия может успешно развиваться на базе сельского хозяйства еще на протяжении нескольких столетий. Более того, развитие мануфактур он объясняет только наличием крепостного труда. Таким образом, Шлецер не видит прямой связи между индустриализацией и становлением капиталистических отношений, которые, по его мнению, могут успешно развиваться путем технического оснащения и увеличения производительности сельского хозяйства.

В целом царствование Александра I способствовало развитию идей либерально настроенных слоев научного сообщества. В период реакции, начавшийся в конце правления Александра I, и усилившийся в царствование Николая I, происходит постепенный отход от либеральных идей. Особый интерес в данной ситуации вызывают работы графа Н.С. Мордвинова и А.И. Бутовского.

В советской литературе Мордвинова часто определяли как «русский Фридрих Лист», за определенное идейное сходство. В своей концепции экономического развития он оперирует длительными временными интервалами (50–60 лет). При этом фундаментом развития выступают частная собственность и законность. Он последовательно выступает за развитие частных банков и расширение деятельности правительства по содействию экономическому росту.

Пиком реакционных идей можно считать работа государственного чиновника А.И. Бутовского «Опыт о народном богатстве, или о началах политической экономии» от 1847 г. Особенно примечательным в данном исследовании является взгляд на социальную политику и крепостное право. Так, Бутовский, следуя закону о народонаселении Мальтуса, утверждает, что в случае наступления массового голода, правительство не должно принимать никаких социальных мер, совершенно бесполезных, с его точки зрения, и призывать население найти утешение в религии. В защиту крепостного права он выводит тезис о том, что оно препятствует переполнению рынка рабочей силы. Более того, оброчное крепостное хозяйство никак не препятствует развитию мануфактурного производства.

С поражением в Крымской войне и воцарением Александра II, тон экономических произведений резко меняется. Все более активно высказываются требования отмены крепостного права, как основной причины неэффективности российской экономики. По этому вопросу активно высказываются один из ярких приверженцев западного либерализма И.В. Вернадский и представитель исторического направления И.К. Бабст. С реформой 1861 г. вопрос крепостного права навсегда уходит из проблемного поля русской экономической мысли.

Период царствования Александра II и Александра III характеризуется ветвлением русской экономической мысли. Усиливается конфликт между «народниками» (А.И. Чупров, Н.Ф. Даниельсон, В.П. Воронцов), которые во многом выступают как наследники славянофильства, и западниками (Н.Х. Бунге, Д.И. Пихно и др.). Позднее на арену вступают сторонники Маркса (Н.И. Зибер, П.Б. Струве).

В основе «крестьянского социализма» народников лежало представление об общинном землевладении, как наиболее эффективной и справедливой форме организации сельского хозяйства. В то же время сельское хозяйство должно было служить основой российской государственности. Они отрицали необходимость индустриализации, последовательно защищая самобытность и самодостаточность русского патриархального общества. Сильнейший голод, разразившийся в 1891 г., в совокупности с расширением российской экспансии, фактически похоронили идеи «русского социализма», сделав их непригодными к обстоятельствам места и времени.

Таким образом, к началу 1890-х гг. путь на индустриализацию фактически стал безальтернативным. В связи с этим, наиболее интересными с точки зрения экономической роли и функций государства представляются труды сторонника исторического направления С.Ю. Витте и выдающегося государственного деятеля П.А. Столыпина, хотя последнего едва ли можно назвать экономистом.

В 1889 г. Витте познакомился с основным трудом Фридриха Листа «Национальная система политической экономии». Работа произвела на него сильное впечатление. Переняв идеи Листа, Витте начинает их активное распространение. С этого же времени он становится активным сторонником индустриализации. В том же году выходит его небольшой труд «По поводу национализма. Национальная экономия и Фридрих Лист», излагающая основные экономико-политические элементы «Национальной системы», снабженные личными комментариями.

Разрешение последней ключевой проблемы, заявленной в начале главы, а именно проблемы общинного землевладения непосредственно связано с аграрной реформой П.А. Столыпина, занимавшего пост премьер-министра с 1907 по 1911 гг.

В условиях быстрого роста промышленного производства, а также в виду резкого увеличения плотности населения в центральной России, неэффективность общинного землевладения становилась все более очевидной. Для решения данной проблемы кабинет Столыпина разработал и осуществил ряд преобразований, ключевыми из которых были: замена коллективной и ограниченной собственности на землю сельских обществ полноценной частной собственностью отдельных крестьян; расширение системы кредитования и субсидирования сельского хозяйства. Продвижение реформы встретило ожесточенное сопротивление левых партий и консервативного крестьянства. В связи с началом Первой мировой войны в 1914 г. объективно оценить результаты реформ довольно трудно.

С началом гражданской войны все производительные силы страны, находившиеся под властью большевиков, были подчинены единой цели «победа любой ценой» в рамках, так называемого, военного коммунизма. Уже в конце осени 1917 г. был создан Высший совет народного хозяйства (ВСНХ), первоочередной задачей которого было введение тотального централизма в управлении народным хозяйством. Однако данная программа натолкнулась на определенное противодействие со стороны первого руководителя ВСНХ В.В. Осинского (Оболенского).

Идеалом Осинского было «государство-коммуна» и стремление к избыточному централизму, по его мнению, неизбежно вели к падению эффективности и всеобщей бюрократизации. Суть его позиции заключалась в том, «что управление любым предприятием должно быть прерогативой данного рабочего коллектива и только такое коллективное, коллегиальное руководство (в форме фабрично-заводского управления – ФЗУ) способно предотвратить бюрократизацию системы и обеспечить демократический характер централизма». ФЗУ – выборный пролетарский орган должен быть коллективным директором предприятия. При этом все органы при ВСНХ должны избираться низами и утверждаться сверху.

Одним из главных антагонистов Осинского был, пожалуй, сменивший его А.И. Рыков, ярый сторонник тотальной централизации и широкомасштабной национализации. Заняв пост, он немедленно лишил местные органы прав на проведение национализации. При этом масштабы и скорость национализации резко увеличились. Он же (наряду с Лариным) явился создателем Главков, что было вызвано неспособностью центра управлять отдельными предприятиями. Предприятия укрупнялись в тресты, тресты – в Главки. Несмотря на утверждение Рыковым тезиса о коллегиальности, которое он продвигал в своих выступлениях, управление повсеместно становилось единоличным.

Гиперцентрализация нанесла колоссальный урон национальному хозяйству. Массово падали производительность труда и объемы производимой продукции. В сложившихся условиях отход от политики военного коммунизма и возвращение к рыночным отношениям уже не вызывал споров в ВКП(б). В начале 1920-х гг. острейший экономический кризис охватил все отрасли народного хозяйства. Возвращение к мирной жизни и необходимость восстановления экономики вынуждали правительство отойти от политики «военного коммунизма» и пойти на развитие рыночных отношений. Результатом этого явилось провозглашение Новой экономической политики (НЭП), основанной на теории государственного капитализма (ГК), разработанной В.И. Лениным.

Согласно Ленину, ГК есть не что иное, как «общенародный учет и контроль над производством и распределением продуктов». Ленин рассматривал пять различных моделей ГК, но самой простой и надежной моделью он называл концессионный ГК. Создание современных и эффективных концессионных предприятий было чрезвычайно выгодно государству: частично решалась проблема занятости; концессионер обеспечивал ввоз продукции, необходимой как рабочим концессионного предприятия, так и, сверх того, для передачи правительству. На основе концессий создавались высокоэффективные предприятия с современным оборудованием, которые впоследствии бы вернулись под государственный

контроль. Обеспечивался дополнительный ввоз современного оборудования, что облегчало электрификацию и модернизацию государственных предприятий. Концессионер обязан был привезти определенное количество специалистов, что должно было поднять и квалификацию отечественных рабочих через обмен опытом. Поощрялся перевод на концессионные предприятия и отечественных специалистов для ознакомления с новым оборудованием. Однако с отходом от рыночной экономики, теория концессионного государственного капитализма фактически была предана забвению.

Вместе с тем после отказа от политики военного коммунизма и начала НЭПа в Госплане СССР развернулись широкие дискуссии о способах регулирования народного хозяйства. В общем виде можно выделить две основные концепции. Сторонники плановой централизованной экономики составляли телеологическое направление (С.Г. Струмилин, Г.М. Кржижановский, Н.Н. Ковалевский). В то же время сторонники комбинированной системы хозяйственного регулирования, включавшей в себя как плановое начало, так и рыночный инструментарий образовали генетическое направление (В.А. Базаров, В.Г. Громан, Н.Д. Кондратьев и др.).

Наиболее ярким представителем телеологии можно считать С.Г. Струмилину. В основе его идей лежал марксистско-ленинский тезис о фундаментальных преимуществах планово-централизованного управления перед рыночной системой регулирования. Однако ни Маркс, ни Ленин не предлагали позитивной теории плановой экономики. Соответственно был поставлен вопрос о методах государственного планирования. В качестве основного метода был выбран балансовый метод. В 1923 г. С.Г. Струмилин выступил с докладом о схеме баланса народного хозяйства, в котором выделялись три основные группы: все виды частного хозяйства; государственное хозяйство; здравоохранение, народное просвещение, вооруженные силы и др.

Накапливаемый опыт балансового планирования был применен при подготовке первой и всех последующих пятилеток и представлял собой систему таблиц с взаимосвязанными разделами и показателями.

В противоположность сторонникам телеологии, сторонники генетики считали важнейшей задачей экономической науки перманентное наблюдение за «поведением» рынка, выявление каузальных повторяющихся явлений, изучение конъюнктурных колебаний, движение курсов валют, процентных ставок, индексов цен. При этом все без исключения генетики стояли на позиции необходимости государственного регулирования экономики. Наиболее эффективной формой регулирования выступало планирование. Но в отличие от плана-директивы телеологов, они выдвигали план-прогноз будущего состояния системы, выводимого из установленных закономерностей предыдущих этапов развития. При этом многие представители направления утверждали, что генетика и телеология не являются антагонистами, а должны находиться в гармоничном единстве. Тем не менее, с приходом к власти Сталина и сворачиванием НЭПа генетики были разгромлены.

### Теоретические основания института государственно-частного партнерства

После распада СССР в 1991 г. и тяжелого процесса приватизации государственной собственности, российское правительство вновь встало перед необходимостью привлечения частного капитала для реализации крупных общественно-значимых проектов и модернизации экономики. В связи с этим уже в начале 1990-х гг. появились работы о необходимости возвращения к политике концессий, как наиболее простому и исторически проверенному инструменту решения поставленных задач. Однако за прошедшее время теория концессионных соглашений претерпела ряд изменений, прежде всего под влиянием либерально-консервативных доктрин, легших в основу институциональной теории государственно-частного партнерства, наиболее ярко проявившейся в рейганомике, тэтчеризме, административно-финансовых реформах Японии и ряда стран Латинской Америки.

С методологической точки зрения современная теория ГЧП базируется на основе смешанной экономики, дополняя и развивая ее. Посредством ГЧП государство отказывается от

неэффективных форм управления, принадлежащей ему собственности. Другой важной основой ГЧП является теория государственного регулирования экономики. Действительно, трудно представить себе сколь-нибудь сложный проект, затрагивающий интересы крупнейших экономических агентов, без необходимости эффективного государственного регулирования. Последним столпом, образующим фундамент обоснования ГЧП, является теория общественного сектора экономики. В рамках ее ГЧП призвано смягчать последствия провалов рынка.

В отечественной литературе весьма популярно определение:

«Хозяйственное партнерство государства и частного сектора – ПГЧС (public-private partnership) – это институциональный и организационный альянс между государством и частным бизнесом в целях реализации масштабных национальных и международных общественно-значимых проектов в широком спектре сфер деятельности: от развития стратегически важных отраслей промышленности и НИОКР до обеспечения общественных услуг» [1]. Ряд зарубежных авторов (особенно в США) придерживаются мнения, что ГЧП представляет собой одну из форм приватизации государственной собственности. Однако в России эти понятия строго разделены на уровне федерального законодательства.

Следует также отметить, что ГЧП как система хозяйствования имеет существенные отличия от частных коммерческих организаций, ориентированных только на получение прибыли. Они подчинены ряду общих принципов, нацеленных на удовлетворение общественных потребностей:

1. Равенство интересов сторон и свобода выбора действий. Этот главный принцип рыночной экономики подразумевает равный доступ всех экономических агентов к услугам частных компаний в сфере общественных услуг, равенство права заключения договоров ГЧП для всех частных компаний, свободу партнеров в выборе форм и методов достижения целей партнерства.

2. Стабильность контракта ГЧП и одновременно возможности его изменения и адаптации. Контракт ГЧП обладает несколькими важными характеристиками: сложность, комплексность и длительный срок реализации. В данном договоре прописываются права и обязанности сторон, формы государственной поддержки, разделение полученных результатов и т.д. Данные положения договора, безусловно, должны быть стабильны. С другой стороны, при наличии соответствующего общественного интереса государство должно обладать правом изменения условий договора и даже его аннулирования в одностороннем порядке. Данное обстоятельство, однако, не должно ущемлять права частной компании обжаловать соответствующее решение органов государственной власти. Таким образом, принцип утверждает необходимость баланса между частными и общественными интересами.

3. Ответственность за исполнение условий контракта.

4. Конкурентность. Как отмечается в литературе, данный принцип проявляется в необходимости проведения конкурса на подписание с государством контракта ГЧП, и равный доступ к участию в данном конкурсе всех желающих частных компаний. Однако данный взгляд является односторонним и учитывает лишь конкуренцию инвесторов за конкретный проект, но не конкуренцию проектов ГЧП за инвестора.

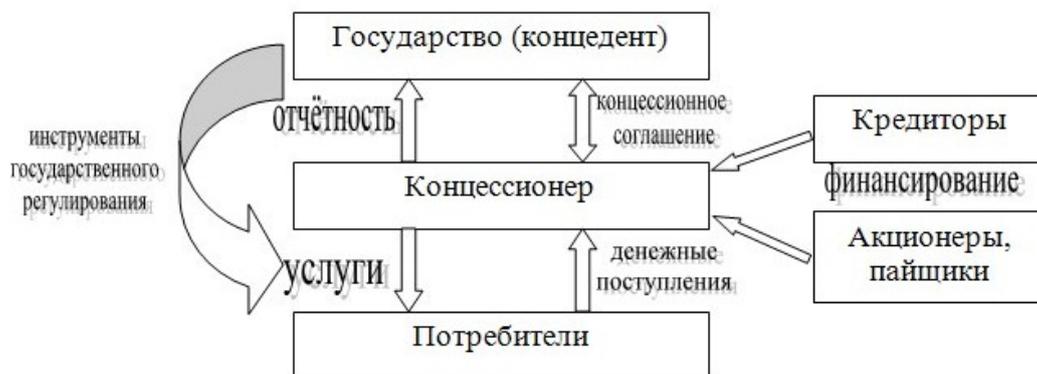
5. Принцип прозрачности и обратной связи. Он подразумевает свободный доступ гражданского общества к полной информации об экономических результатах объекта ГЧП.

6. Принцип стимулирования и гарантий. Подразумевается наличие широкого инструментария стимулирования частного сектора к участию в проектах ГЧП.

7. Принцип равноправного отношения к иностранным компаниям.

В настоящее время ГЧП часто характеризуется как основной элемент функционирования смешанной экономики. При этом именно концессии признаются наиболее эффективной формой партнерства государства и бизнеса, имеют глубокую теоретическую освещенность и длительную историю применения во многих странах мира, в то время как другие формы часто носят либо сугубо национальный характер, трудно применимый в иных социально-экономических условиях, либо их теоретическая проработка находится на начальном этапе.

В общем виде под концессией понимают систему отношений, с одной стороны, государства или муниципального образования (концедента), а с другой стороны, частного юридического или физического лица (концессионера), складывающуюся в соответствии с действующим законодательством и договором между ними (рис. 1). В рамках данной системы отношений концедент в лице публичного органа власти наделяет концессионера правом для достижения общественных целей осуществлять некоторые из своих функций. Даннь



Всемирный банк выделяет три основных вида концессий: реконструкция – управление – передача (rehabilitate – operate – transfer, ROT); реконструкция – аренда – передача (rehabilitate – lease – transfer, RLT); расширение – управление – передача (build – rehabilitate – operate – transfer, BROТ).

Концессионная деятельность в России осуществляется на основании федерального закона №115 ФЗ «О концессионных соглашениях», гражданского кодекса, а также региональных законов и других нормативных актов. Сфера применения концессионных соглашений чрезвычайно широка и включает в себя:

- природные ресурсы России (полезные ископаемые, растительные и животные ресурсы);
- объекты экономической инфраструктуры;
- группу объектов в сфере общественных услуг (куда входит и ЖКХ);
- государственные и муниципальные предприятия;
- некоторые виды хозяйственной, либо иной общественно полезной деятельности.

Как видно из сферы применения концессий, государство позиционирует данную форму ГЧП, как универсальный инструмент управления государственной и муниципальной собственностью.

Однако развитие отраслевой правовой базы идет крайне медленно. Разработанные типовые формы концессионных соглашений вызывают немало критики со стороны специалистов. Отраслевой закон должен очень скрупулезно учитывать специфику каждой отдельной отрасли. Особенно, когда речь идет об общественной собственности. Особые сложности возникают в создании правовой базы для концессионной деятельности на рынке коммунальных услуг. Данный рынок имеет ярко выраженную специфику, которая рождает немало заблуждений у органов государственного и муниципального управления.

### Концессионная модель организации и управления рынком коммунальных услуг

Жилищно-коммунальная услуга (работа) – это деятельность, имеющая или не имеющая материального воплощения, основанная на взаимодействии производителя и потребителя по поводу содержания общего имущества многоквартирного дома, а также организации холодного и горячего водоснабжения, водоотведения, электроснабжения, газоснабжения и отопления в частном секторе и в рамках управления многоквартирными домами.

Жилищно-коммунальные услуги обладают рядом специфических свойств, связанных с особенностью отраслевых финансовых отношений, таких как: неэластичность спроса, сильная зависимость от местных условий и сочетание различных типов рыночных структур (монополии, естественной монополии, конкуренции). Потребность в жилищно-коммунальных услугах постоянна. Чем более неблагоприятны условия проживания населения и функционирования предприятий, тем более разрушительные последствия могут иметь разрывы в предоставлении данного вида услуг вне зависимости от того, чем они вызваны (износом основных фондов производителя; структурными изменениями в отрасли и др.). Вместе с тем производители имеют гарантированный рынок сбыта.

Услуги ЖКХ бесспорно можно отнести к категории общественных благ, которые характеризуются двумя основными свойствами: отсутствием соперничества в потреблении и неисключаемостью (технической невозможностью исключить доступ к благу дополнительных потребителей).

Для обоснования отнесения услуг ЖКХ к конкретному виду общественных благ, логично и необходимо разделить услуги ЖКХ: на собственно жилищные (или услуги по управлению многоквартирным домом) и коммунальные (адресные услуги, количество которых можно измерить). Собственно говоря, в ходе исследования не было выявлено ни одной объективной причины для существования термина ЖКХ, в виду наличия кардинальных отличий, как в технологических функциях предприятий отрасли, так и рыночных структур, в которых они работают, а также характера предоставляемых услуг с точки зрения теории общественных благ. Не вдаваясь в подробности, следует сказать, что жилищные услуги представляют собой групповую или коллективную потребность людей, живущих в отдельном подъезде, доме, микрорайоне. По своему характеру жилищные услуги могут быть отнесены к смешанным клубным благам (клубное благо отражает благо коллективного потребления с ограниченным доступом).

В отличие от жилищных услуг, современные системы инженерного оборудования позволяют установить контроль над потреблением коммунальных услуг отдельными потребителями. А следовательно, существует возможность исключения потребителей, не осуществляющих своевременную оплату услуги. Таким образом, коммунальные услуги обладают признаками частного блага: исключаемость и делимость. Однако следует заметить, что данный факт не может быть основанием для утверждения, что рынок коммунальных услуг является конкурентным.

Главную роль в формировании общественного характера рынка коммунальных услуг имеет всеобщий и безусловный характер потребления. Производство, транспортировка и распределение коммунальных услуг формируют единую инженерную систему. Подобная жесткая связь между производством и потреблением услуг исключает возможность существования в отрасли частной собственности. При этом: «Три главных свойства коммунальных услуг (незаменимость, доступность и свойство насыщения потребностей) исключают их рыночный характер».

Таким образом, рынок коммунальных услуг является естественной монополией с доминирующей государственной собственностью, что обусловлено проявлением их общественной сущности. Приватизация данной отрасли катастрофическим образом подрывает интересы потребителей. Следовательно, любые изменения в правовом поле функционирования отрасли не должны затрагивать вопросы перехода прав собственности на соответствующие инженерно-технические сооружения. Что не исключает привлечение частных инвесторов в отрасль с целью поддержания ее работоспособности и повышения эффективности, прежде всего в рамках системы государственно-частного партнерства.

Рынок коммунальных услуг, как естественная монополия, неоднократно становился предметом исследования зарубежных авторов в рамках теорий неоклассического синтеза и различных теорий функционирования монополий. В то же время работы, основанные на новой институциональной теории контрактов и применяющие сравнительный институциональный анализ, практически неизвестны.

При рассмотрении предприятий коммунального сектора с точки зрения новой институциональной теории были выявлены следующие ключевые характеристики трансакций: высокая степень оппортунистического поведения в стадии *ex post* контрактов и наличие идиосинкразических активов. Что объясняет склонность отрасли к нестандартной контрактации, то есть монополии. Таким образом, полученный вывод идентичен пониманию рынка коммунальных услуг, как естественной монополии, но исходит не из общественного характера коммунальных услуг, а из экономии трансакционных издержек.

С точки зрения формирования эффективной политики ГЧП для решения задач управления государственной и муниципальной собственностью при реализации общественно значимых проектов коммунального хозяйства в условиях крупного города, как Санкт-Петербург, особое значение имеет институциональная среда. Прежде всего необходимо понимать особенности архитектурно-территориального развития данного мегаполиса. Для этого необходимо обратиться к генеральным планам развития города советского и постсоветского периодов и выявить те ключевые факторы, которые, с одной стороны, определяют современный облик города, а с другой – являются причиной технической недооснащенности секторов генерации и дистрибуции воды, газа, электрической и тепловой энергии.

На наш взгляд, ключевое отличие в подходах к развитию города советского и постсоветского периодов является система территориальных отношений города и области. В советское время город и область рассматривались как единое целое, и градостроительная политика опиралась на комплексное динамичное развитие двух регионов.

Основа современной системы коммунального хозяйства была заложена в ходе реализации двадцатилетнего плана развития Ленинграда с 1966 по 1986 гг. В течение данного периода шло активное освоение новых территорий, которое сопровождалось широким строительством инженерно-технических сооружений: котельных, электро-подстанций и распределительных сетей. Разработка следующего генерального плана развития города до 2005 г. велась в 1987–1990 гг. План подразумевал сохранение темпов жилищного строительства, но в отличие от предыдущего - широкого освоения новых территорий не предполагалось. Вместо этого была утверждена концепция уплотнительной застройки. Однако, крах советской системы в 1991 г. и разделение города и области в 1992 г., сделали реализацию плана затруднительной, а последующий экономический кризис и отсутствие бюджетного финансирования – невозможной. Вместе с тем план 1987 г. оставался рамочным документом в течение длительного периода времени. Только в 2001 г. началась разработка нового генерального плана «Открытый европейский город» на период 2005–2025 гг.

Тем не менее, несмотря на то, что инвестиции в коммунальный сектор до сих пор не покрывают выбывающие мощности, инфраструктура отрасли пострадала несколько менее, чем в других регионах. Вместе с тем улучшение демографической ситуации и приток мигрантов увеличили население города до 5,03 млн жителей в 2013 г. Таким образом, нагрузка на сектор быстро возрастает. В сложившихся условиях модернизация коммунальной инфраструктуры города становится жизненно-необходимой.

Исходя из условий институциональной среды, ключевой проблемой построения эффективной концессионной политики становится адекватное распределение рисков между государством и бизнесом на всех этапах реализации концессионного контракта. Вместе с тем, при рассмотрении ситуации с точки зрения сравнительного институционального анализа можно утверждать, что наличие большого количества рисков не является сугубо отрицательным фактором. При равномерном распределении между участниками соглашения высокие риски могут способствовать большей отношенческой адаптации, так как разрыв соглашения означает значительные потери для всех заинтересованных сторон.

## Научная ценность исследования

1. Проведенная историческая реконструкция представлений о роли и функциях государства в истории русской экономической и управленческой мысли позволила выявить ключевые вопросы путей развития, эффективности крепостного хозяйства и коллективной

собственности на средства производства, находившиеся в поле научного поиска экономистов Российской империи и рассмотреть особенности восприятия различных экономических школ в контексте российской экономической действительности, а также ключевые концепции государственного управления экономикой в советской экономической мысли, от концепции «главизма» до споров о государственном планировании. Проведенное исследование имеет квазинаучную ценность в виду недостаточной проработанности данной темы в литературе по истории экономических учений.

2. Анализ теоретических основ ЖКХ подтвердил гипотезу о научной несостоятельности рассмотрения ЖКХ, как единой отрасли, в виду фундаментальных различий между подотраслями, объединенными данным термином. Жесткое разграничение между жилищным и коммунальным хозяйственными комплексами обусловлена не только технологическими функциями входящих в них предприятий, но и различными рыночными структурами, в рамках которых осуществляется их деятельность.

3. Исследование рынка коммунальных услуг с точки зрения сравнительного институционального анализа позволило выявить ключевые атрибуты таких трансакций в данной отрасли, как высокая степень оппортунистического поведения в стадии *ex post* контрактов и наличие идиосинкразических активов.

4. Исследование форм контрактации на рынке коммунальных услуг на основе теории трансакционных издержек с учетом выявленных ключевых атрибутов трансакций позволило сделать вывод об эффективности концессии, как относительно прямого государственного управления отраслью, так и рыночной формой её организации.

## Публикации

1. Шапиро Н.А., Горячий С.А. Государство и рынок: Концессии как форма взаимодействия // Электронный научный журнал. Экономика и экологический менеджмент. 2011. Вып. 2: <http://economics.open-mechanics.com>.
2. Горячий С.А. Концессионная модель организации рынка коммунальных услуг // Электронный научный журнал. Экономика и экологический менеджмент. 2012. Вып. 1: <http://economics.open-mechanics.com>.
3. Горячий С.А. Модернизация коммунальной инфраструктуры Санкт-Петербурга на основе государственно-частного партнерства // Электронный научный журнал. Экономика и экологический менеджмент. 2013. Вып. 2: <http://economics.open-mechanics.com>.
4. Горячий С.А. Концессии – перспективы инновационного развития коммунального хозяйства России // Россия: потенциал инновационного развития. Сб. научных статей аспирантов и студентов. Вып. 10. СПб., 2011. С. 210–214.
5. Горячий С.А. Государственно-частное партнерство в процессе модернизации сектора ЖКХ – от договора аренды к концессионному соглашению // Международная научно-практическая интернет-конференция «Актуальные теоретические и практические аспекты развития предприятий различных форм собственности в контексте модернизации экономики» (22 апреля 2011 г.): Мат-лы конференции. СПб., 2011.
6. Горячий С.А. Проблемы формирования эффективной концессионной политики в условиях модернизации экономики // Вторая международная научно-практическая интернет-конференция «Актуальные теоретические и практические аспекты развития предприятий различных форм собственности в контексте модернизации экономики» (1 декабря 2011 г.): Сб. трудов конференции. СПб., 2011.
7. Горячий С.А. Мировой опыт модернизации и управления сектором жилищно-коммунального хозяйства на основе концессий // Мат-лы VII Международного форума «От науки к бизнесу» – «Глобализация инноваций» (15–17 мая 2013 г.). СПб., 2013. С. 57–59.

## Литература

1. Варнавский В.Г. Партнерство государства и частного сектора: Теория и практика // Мировая экономика и международные отношения. 2002. № 7. С. 28–37.



Зацепина Марина Евгеньевна  
Факультет оптико-информационных систем и технологий  
Кафедра прикладной и компьютерной оптики  
E-mail: marichka\_za@list.ru

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ТЕНЕВОГО МЕТОДА, ОСНОВАННОГО НА ПРИМЕНЕНИИ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ

М.Е. Зацепина

Научный руководитель – профессор В.К. Кирилловский

### Введение

Методы и средства контроля и аттестации оптики развиваются путем создания измерительных систем, позволяющих получать результаты аттестации в количественной форме, автоматически регистрировать необходимый объем информации об исследуемой системе, получать измерительные данные в таком виде, который наиболее целесообразен для ввода в ЭВМ и автоматические системы управления технологическими процессами.

Основными направлениями развития средств контроля и аттестации оптических систем и элементов являются:

- замена качественных (субъективных) методов количественными (объективными) методами измерений;
- повышение точности измерений;
- все более широкое внедрение средств автоматизации операций контроля;
- получение полной измерительной информации об оптических характеристиках поверхности или системы, количественной карты ошибок всей оптической поверхности;
- автоматизация обработки данных и получение результатов контроля и аттестации в количественной (цифровой) форме.

Эти задачи успешно решаются благодаря все более широкому применению средств, рожденных современными научно-техническими достижениями: лазеров, научной и прикладной, а также цифровой фотографии, телевизионной техники, устройств связи с компьютером, средств компьютерных технологий. От уровня развития методов и средств исследований и измерений, от пределов точности и чувствительности, достигаемых в процессе измерений, зависит достоверность характеристик исследуемых систем.

С помощью теневого метода, разработанного в 1856 г. Леоном Фуко, поверхность деформаций волнового фронта визуализируется как полутоновая картина (рис. 1), позволяющая наглядно отображать волновые aberrации и интуитивно оценивать по ним характер и структуру ошибок обработки данной оптической поверхности [1]. Метод используется для обнаружения поперечных aberrаций оптической системы.

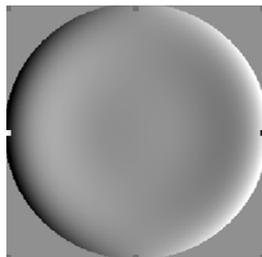


Рис. 1. Полутоновая теневая картина, отображающая деформации волнового фронта

Результаты визуальных оценок оптических систем и элементов теньвым методом ножа Фуко, применяемые при их изготовлении, не позволяют определять в количественной форме

волновые aberrации системы и характеристики качества создаваемого изображения, такие как распределение освещенности в пятне рассеяния и др. Это в свою очередь не дает возможности точно количественно аттестовать систему и исключает автоматизацию контроля.

Классический теневой метод применяется в настоящее время преимущественно для технологического контроля в форме качественных оценок состояния оптических поверхностей и материалов, а также уровня aberrаций оптических элементов и систем. Возможности выполнения количественных исследований до недавнего времени были весьма ограничены [2].

### Цель работы

Целью работы является разработка и исследование количественного теневого метода. Он основан на использовании компьютерной изофотометрической трансформации плавной функции распределения освещенности полутоновой теневой картины в изображение системы полос. Aberrации, передаваемые теневой картиной, отображаются на полосах как искривления. Система полос теневого изображения, полученная в результате трансформации, аналогична геометрической модели тенеграммы линейной решетки. В результате обработки исследователь получает карту деформаций волнового фронта системы, таблицу коэффициентов Цернике, а также характеристики качества изображения, создаваемого исследуемой оптической системой, такие как функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ) и частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

### Задачи исследования

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

- рассмотрение общих принципов традиционных качественных теневых методов визуализации деформаций волнового фронта;
- выполнение исследований и разработок, позволяющих оснастить традиционную теневую установку матричной камерой, соединенной с компьютером, специальное программное обеспечение которого превращает теневую картину ножа Фуко в тенеграмму линейной решетки; ее дальнейшая обработка выполняется при помощи созданных нами ранее компьютерных программ расшифровки интерферограмм сдвига [3];
- разработка математических основ компьютерной изофотометрии теневой картины ножа Фуко, позволяющей трансформировать тенеграмму в требуемую систему полос;
- разработка принципов расшифровки и интерпретации полученной теневой картины линейной решетки по аналогии с интерферограммой сдвига;
- разработка и исследование методов восстановления деформаций волнового фронта по двум трансформированным теневым картинам, полученным при положении лезвия ножа Фуко в двух взаимно перпендикулярных направлениях;
- разработка и исследование макетного образца установки.

### Методы исследования

Для реализации количественного теневого метода в современных условиях может быть эффективно использован метод изофотометрии, ранее разработанный для исследования структуры оптического изображения, связанного с ФРТ при оценке характеристик качества изображения оптической системы. В современных условиях используются различные электронные приемники изображения, включая матричные.

Количественная тенеграмма создается с использованием тест-объекта типа «полубесконечная светящаяся линия». Теневая картина, сформированная из полутоновых деталей, наглядно демонстрирующих неровности профиля в виде функции первой производной от поверхности ошибок волнового фронта (то есть функции поперечных aberrаций), регистрируется матричной камерой, присоединенной к компьютеру, оснащенной необходимым комплектом программ. Плавная функция распределения освещенности в полутоновом теневом изображении трансформируется в систему параллельных сечений

поверхности – изолиний по ряду уровней интенсивности (рис. 2). Если на исследуемую тенеграмму наложен фотометрический клин, то создается карта изображения в виде системы линейных контуров – изофот, которая аналогична геометрической модели тенеграммы линейной решетки (рис. 3).

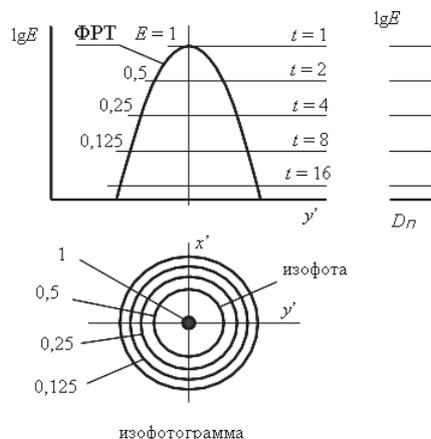


Рис. 2. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления на примере исследования функции рассеяния точки и вид изофотограммы

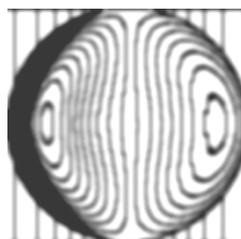


Рис. 3. Трансформация теневой картины Фуко в геометрическую модель тенеграммы линейной решетки

Использование разработанной ранее программы обработки интерферограмм сдвига «Tiger» [3] для обработки и анализа исследуемых тенеграмм линейной решетки дает возможность восстанавливать волновой фронт и получать количественную информацию о его ошибках, а также рассчитывать необходимые характеристики качества изображения исследуемой поверхности или системы, такие как ФРТ, ФРЛ и ЧКХ. Важная особенность этой программы состоит в том, что она может обрабатывать не только классические интерферограммы, но и тенеграммы линейной решетки (по сути являющиеся интерферограммами сдвига) методом обработки двух интерферограмм, с взаимно-перпендикулярным направлением сдвига (рис. 4).

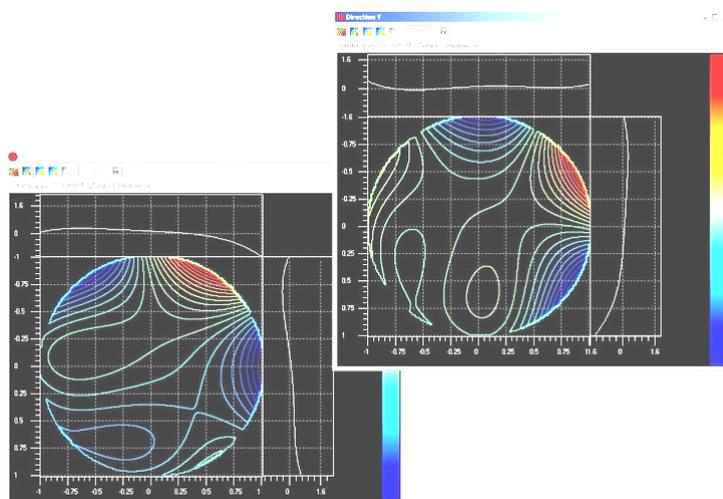


Рис. 4. Обработка двух тенеграмм линейной решетки в программе «Tiger»

### Схема экспериментальной установки

Схема установки [4] для реализации предлагаемого теневого метода (рис. 5) состоит из следующих элементов: 1 – лампа, 2 – конденсор, 3 – матовое стекло, 4 – тест-объект «полубесконечная щель», 5 – объектив коллиматора, 6 – исследуемый объектив, 7 – выходной зрачок исследуемого объектива, 8 – нож Фуко, перекрывающий изображение тест-объекта, 9 – объектив фотокамеры, 10 – матричная камера, 11 – приемник изображения, 12 – компьютер в режиме обработки тенеграмм.

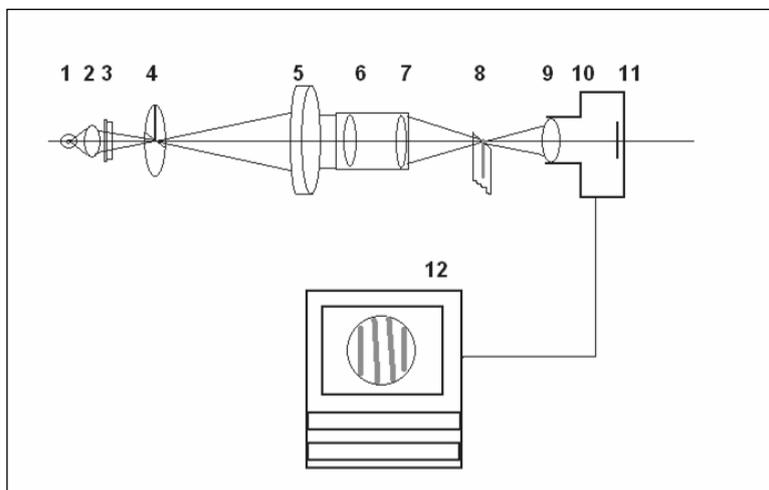


Рис. 5. Схема установки для реализации изофотометрического теневого метода ножа Фуко

### Конструкция экспериментальной установки

Основные элементы экспериментальной установки представлены на рис. 6–9.



Рис. 6. Блок осветителя и тест-объекта

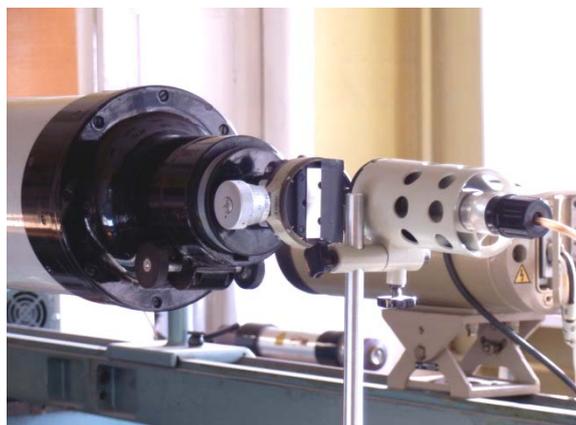


Рис. 7. Блок тест-объекта типа «полубесконечная светящаяся линия»

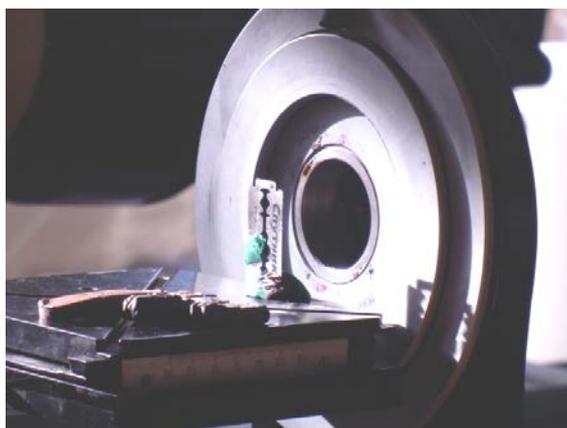


Рис. 8. Блок держателей исследуемого объектива, матричного регистратора и ножа Фуко

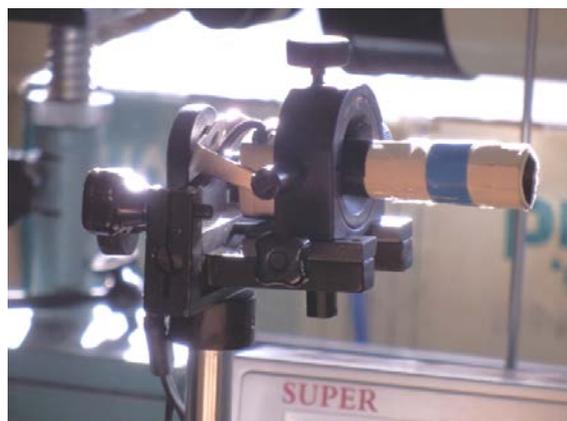


Рис. 9. Матричный регистратор на блоке держателя камеры

### Компьютерная обработка тенеграмм

Предмет исследования – фотообъектив «Индустар-50».

Рабочее излучение – белый свет.

Изображение тенеграмм (рис. 10) получено на созданной установке (рис. 6).

Положения ножа Фуко относительно объектива по осям X и Y получены поворотом испытуемого объектива в держателе оптической скамьи ОСК-2 ЦЛ на угол 90°.

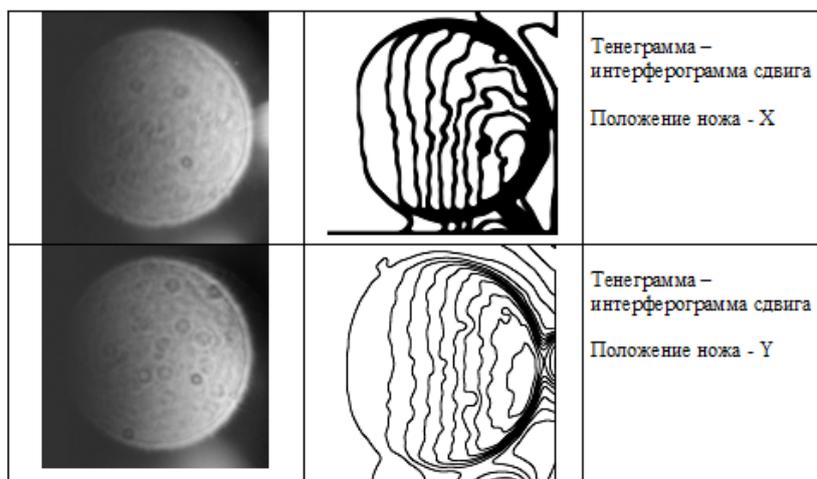


Рис. 10. Изофотометрическая трансформация тенеграмм

### Обработка изофот теневых картин в программе «Tiger»

Результат автоматического распознавания цифровых массивов координат полос представлен на рис. 11.

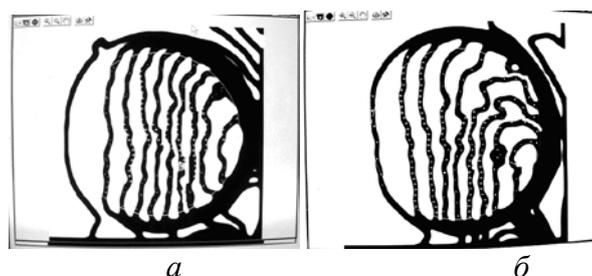


Рис. 11. Изофотограммы теневой картины aberrаций объектива при положении ножа: а – по оси X с компьютерной разметкой координат; б – по оси Y

Трехмерное изображение поверхности волновых aberrаций исследуемой системы изображено на рис. 12.

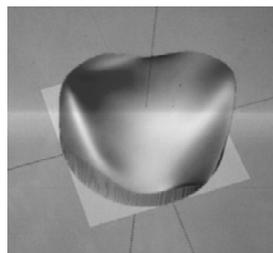


Рис. 12. 3D-график поверхности волновых aberrаций

ЧКХ исследуемой системы (совместная обработка массивов для тенегрэм при взаимно-перпендикулярном положении ножа Фуко) представлена на рис. 13.

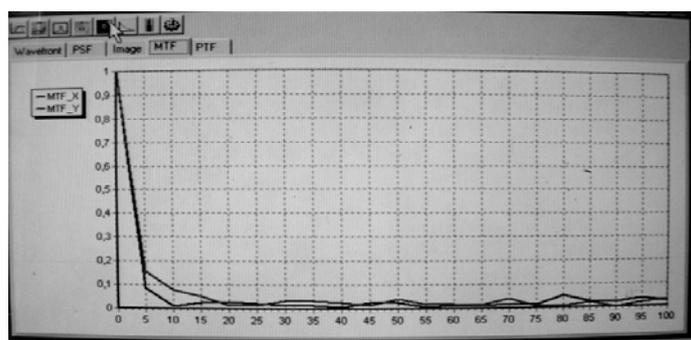


Рис. 13. Графики ЧКХ

Вид ФРТ как характеристики качества изображения системы, исследуемой количественным теньевым методом, проиллюстрирован рис. 14.

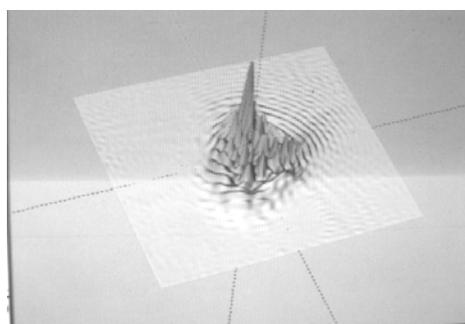


Рис. 14. 3D-график функции рассеяния точки

### Основные достигнутые результаты

Основным результатом данной работы является компьютеризация традиционного качественного теневого метода ножа Фуко и превращение его в количественный теньевой метод повышенной точности. Найдена возможность автоматического измерения волновых aberrаций исследуемой оптической системы. Несомненное преимущество разработанного метода –

возможность расчета характеристик качества изображения, например ФРТ, ФРЛ, ЧКХ, что ныне осуществляется лишь на современных дорогостоящих интерферометрах типа ZYGO, Meller-Wedel и их аналогах. Это преимущество позволяет выполнять контроль качества оптических систем с несоизмеримо меньшими экономическими затратами.

К достоинствам предложенного метода можно отнести: простоту и высокую точность измерений (на уровне  $1/50 \lambda - 1/100 \lambda$ , что соответствует чувствительности теневой картины ножа Фуко); возможность работы с использованием белого источника излучения и в широком спектральном диапазоне, а также на любой выделенной длине волны. Отметим малую чувствительность к вибрациям; простоту и наглядность интерпретации характера и локализации аберраций и ошибок исследуемого волнового фронта, либо контролируемой оптической поверхности.

Предложенный метод измерения существенно расширяет и углубляет возможности оптических исследований, выполняемых традиционными теневыми методами в условиях цехов и лабораторий. Чувствительность к ошибкам поверхностей и аберрациям оптических систем повысилась в 2–5 раз благодаря трансформации тенеграммы путем ее оконтуривания, а также автоматизации при компьютерной расшифровке. Калибровка данного метода выполняется путем сопоставления результатов обработки изофотометрической тенеграммы с классической интерферограммой (например, Физо), полученной при контроле того же объектива.

### Области возможного использования результатов

Предложенный компьютеризированный количественный теневой метод ножа Фуко отличается оригинальностью и открывает существенно новые возможности для оптических исследований и контроля качества изображения систем, выполняемых на производстве и в оптических лабораториях.

Современная компьютерная реализация разработанного метода указывает на перспективы создания автоматизированного измерительного комплекса для контроля волновых аберраций, а также ошибок прецизионных оптических поверхностей, вместе с расчетом всех необходимых характеристик качества изображения, создаваемого контролируемой системой.

Полученные научные результаты вносят существенный вклад в совершенствование теоретических и методологических основ оптической науки. Метод найдет эффективное применение в оптическом производстве и исследованиях.

### Заключение

Впервые в мировой практике после изобретения теневого метода Фуко тенеграмма становится источником исчерпывающей информации, как качественной, так и количественной, для оценки и измерения характеристик качества исследуемой оптической системы и обрабатываемой оптической поверхности.

### Публикации

1. Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. Исследование и компьютеризация теневого метода Фуко // Альманах научных работ молодых ученых ХLI Научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 85–90.
2. Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. Разработка количественного теневого метода // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2012. С. 32–34.
3. Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. Актуальный метод компьютерной расшифровки теневой картины линейной решетки с целью высокоточного измерения деформаций полированной поверхности // Мат-лы Всероссийской молодежной научной школы «Как превратить научную идею в эффективную заявку на грант». СПб., 2012. С. 32–34.

4. Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. Современный метод количественной расшифровки теневой картины линейной решетки // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика-2012». Т. 2. СПб., 2012. С. 130–133.
5. Зацепина М.Е. Систематизация и исследование количественных теневых методов // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 17–19.
6. Зацепина М.Е. Классический теневой метод ножа Фуко и модернизированный количественный теневой метод // Инновации в экономике, проектном менеджменте, образовании, юриспруденции, социологии, медицине, экологии, философии, психологии, физике, технике и математике: Сб. научных статей по итогам Международной заочной научно-практической конференции (29–30 апреля 2013 г., Санкт-Петербург). СПб., 2013. С. 96–99.
7. Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2 (171). С. 226–230.

## Литература

1. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 2. Основы теории чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения: Учебное пособие. СПб., 2003. – 60 с.
2. Зацепина М.Е. Классический теневой метод ножа Фуко и модернизированный количественный теневой метод // Инновации в экономике, проектном менеджменте, образовании, юриспруденции, социологии, медицине, экологии, философии, психологии, физике, технике и математике: Сб. научных статей по итогам Международной заочной научно-практической конференции (29–30 апреля 2013 г., Санкт-Петербург). СПб., 2013. С. 96–99.
3. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Ч. 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб., 2008. – 131 с.
4. Зацепина М.Е., Кирилловский В.К. Схемное решение установки для определения ошибок волнового фронта современным количественным теневым методом повышенной точности // Сб. трудов Международной конференции и семинаров. Т. 1. «Оптика-2013». Т. 2. «Терагерцовая оптика и спектроскопия», «Оптические метаматериалы, фотонные кристаллы и наноструктуры» (Санкт-Петербург, 14–18 октября 2013 г.). СПб., 2013. С. 310–312.



**Златов Андрей Сергеевич**  
Факультет фотоники и оптоинформатики  
Кафедра оптической физики и современного естествознания  
E-mail: zlatov@oi.ifmo.ru

## КОМПАКТНЫЙ СЧИТЫВАТЕЛЬ ДЛЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МЕТОК С ВЫСОКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТЬЮ, СОЗДАВАЕМЫХ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР

А.С. Златов

Научный руководитель – профессор В.А. Полищук

### Цели и задачи

Научно-техническое исследование посвящено созданию прототипа компактного автоматизированного автономного считывателя защитных люминесцентных меток на основе квантовых точек CdSe/ZnS, люминесцирующих в видимом диапазоне.

В работе основное внимание уделено разработке специализированного автоматизированного спектрального сканера, позволяющего максимально эффективно использовать существующие преимущества, имеющиеся у люминесцентных меток, производимых на базе квантовых точек, связанных с информационной емкостью и степенью защиты.

Основная цель – разработка, построение и испытание прототипа образца автоматизированного автономного считывателя защитных люминесцентных меток на основе квантовых точек. Для этого должны быть решены следующие задачи:

- разработка оптимальной оптической схемы считывателя;
- подбор электронных комплектующих и разработка электронной схемы;
- программирование управляющего микроконтроллера;
- создание компьютерной программы для получения и обработки данных, полученных со считывателя;
- апробация созданного прототипа считывателя на экспериментальных образцах меток на базе квантовых точек.

### **Используемые образцы**

В качестве объекта исследования на этапе тестирования полученного прототипа были использованы квантовые точки CdSe/ZnS размером 2,5 нм (люминесценция в зеленой области) и 5 нм (люминесценция в красной области) [1]. В качестве матрицы использованы пористая бумага с произвольным размером пор в пределах 0,1–10 мкм [2]. Диаметр активной области люминесцентной метки составлял 10 мм, каждая из них содержала не более 5 мг квантовых точек. В качестве растворителя использовался гексан. Все образцы измерялись непосредственно после их изготовления при комнатной температуре 25 °С.

### **Достигнутые результаты**

На первом этапе работы был произведен подбор оптимальной оптической схемы для считывателя. Для того, чтобы считыватель имел компактные размеры, требуется использовать компактные оптические компоненты и крайне нежелательно наличие каких-либо подвижных элементов. Использование призмного спектрометра не подходит для решения поставленной задачи, потому что в своей конструкции он требует элементов большого размера. Малые размеры конечного прибора можно сохранить только за счет использования оптических пучков малого размера, что в данной задаче значительно ухудшит характеристики конечного устройства [3].

Фурье-спектрометр предполагает наличие подвижных элементов, что потребует дополнительного пространства для размещения в считывателе автоматизированной механики. Дифракционный спектрометр не требует оптических элементов большого размера и его схема не предполагает использования подвижных элементов, поэтому в качестве диспергирующего спектрального элемента в данной работе была выбрана дифракционная решетка.

В разработанном считывателе (рис. 1) свет, излучаемый люминесцентной меткой, собирается входной линзой (диаметр 6,35 мм, фокусное расстояние 10 мм), фильтруется диафрагмой (диаметр отверстия 50 мкм), коллимируется первым вогнутым зеркалом (диаметр 12,7 мм, фокусное расстояние 9,5 мм) и попадает на отражательную дифракционную решетку (1200 штр./мм, 12,7×12,7 мм). Далее вторым параболическим зеркалом (диаметр 12,7 мм, фокус 12,7 мм) разложенное в спектр излучение собирается на ПЗС-матрице (5150 пикселей высотой 7 мкм и шириной 7 мкм). При этом каждая длина волны фокусируется на ПЗС-линейке на своей группе пикселей.

В собранной схеме рабочий диапазон спектрометра равен 400–750 нм, спектральное разрешение составило 2 нм.

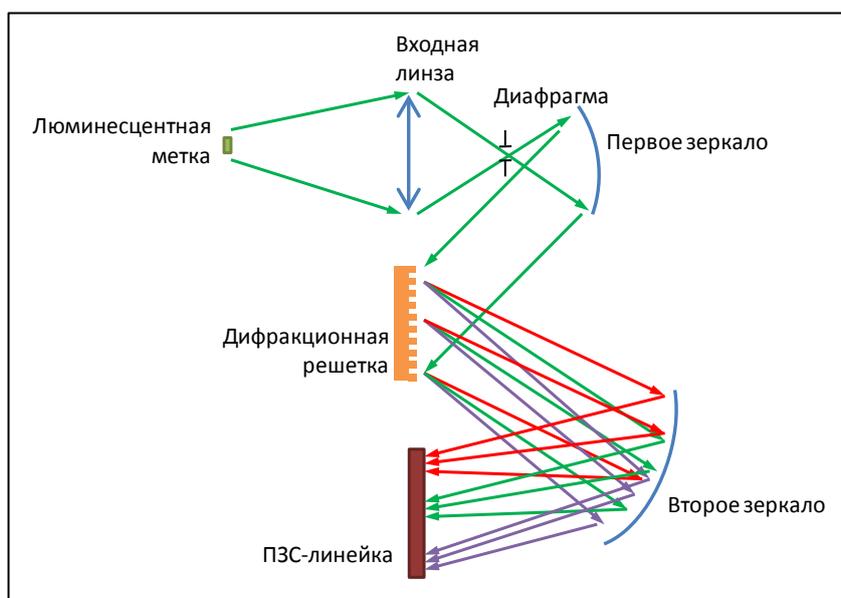


Рис. 1. Оптическая схема считывателя

Для дальнейшего размещения оптических элементов был создан трехмерный чертеж корпуса компактного считывателя (рис. 2), высота его составила 15 мм, ширина 60 мм, длина 90 мм.

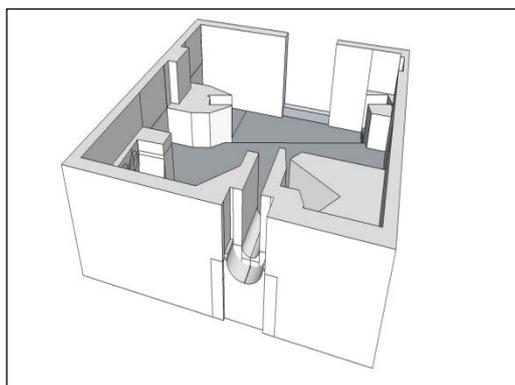


Рис. 2. Трехмерный чертеж корпуса компактного считывателя

Для управления ПЗС-матрицей и обработки поступающих с нее данных создана электронная схема на базе микроконтроллера Atmel ATmega2560. Блок-схема электронной части считывателя приведена на рис. 3. Источник возбуждения люминесцентной метки сканера не входит в состав считывателя, метка возбуждается внешним лазерным ультрафиолетовым источником мощностью 20 Вт, работающем на длине волны 405 нм.

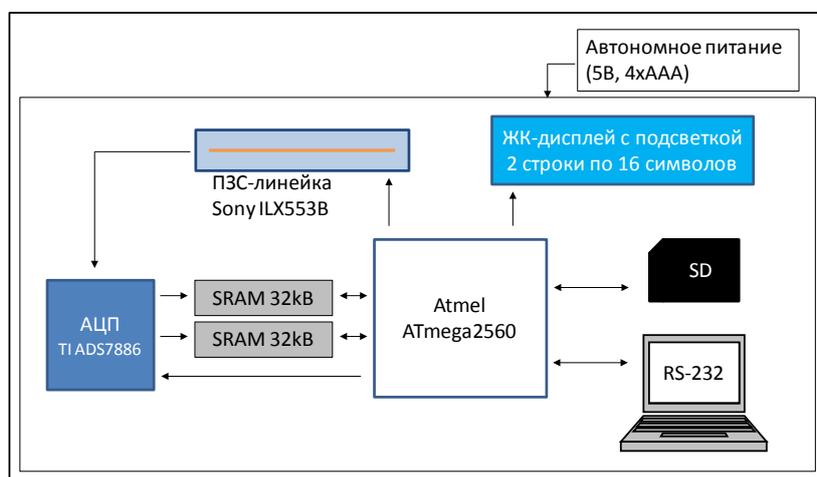


Рис. 3. Блок-схема электронной части считывателя

Управление ПЗС-линейкой, аналого-цифровым преобразователем (АЦП), оперативной памятью, ЖК-дисплеем, картой памяти формата SD и связью с компьютером по интерфейсу RS-232 осуществляет микроконтроллер Atmel ATmega2560, работающий на частоте 16 МГц. Сбором данных с ПЗС-линейки занимается АЦП. После получения данных он немедленно их записывает в оперативную память, из которой в конце цикла чтения они считываются микроконтроллером, обрабатываются и передаются на карту памяти или компьютер. Статус измерения, а также количество обнаруженных спектральных пиков отображается на небольшом ЖК-экране. Вся схема работает автономно, для питания используются четыре щелочных элемента типоразмера R03 с номинальным напряжением 1,5 В.

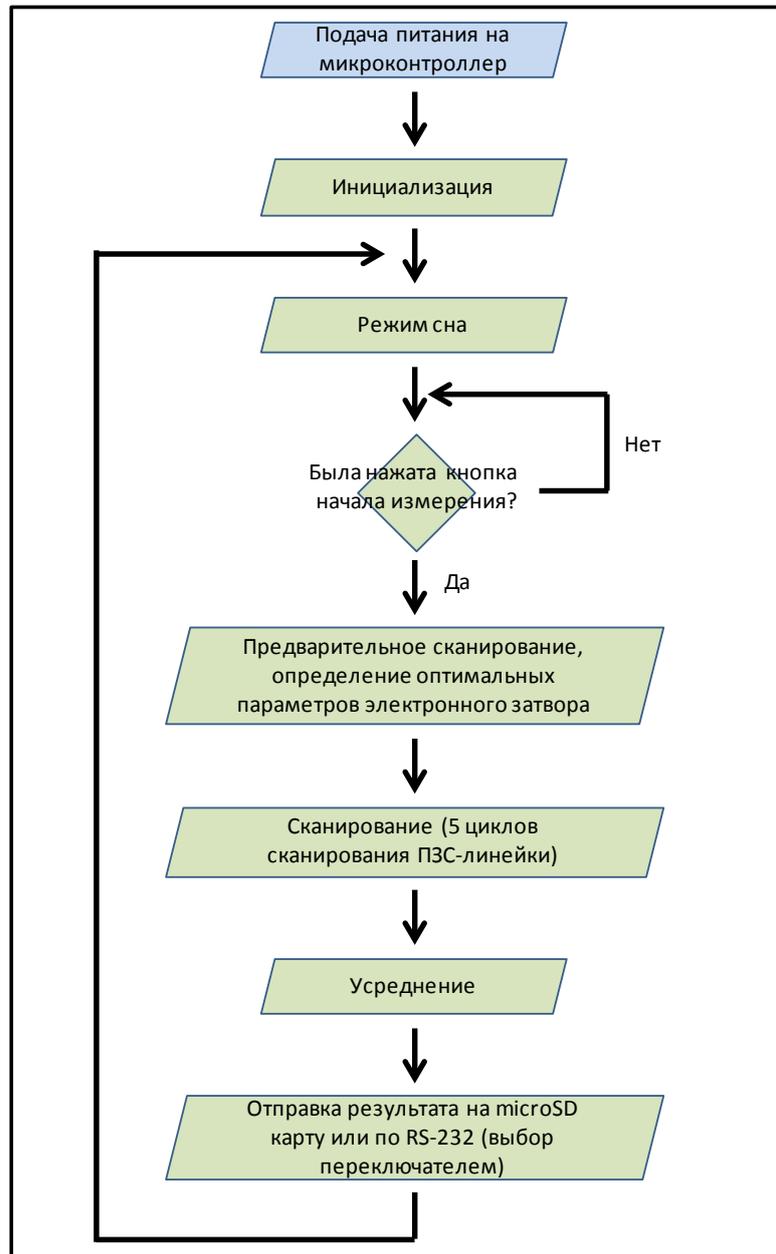


Рис. 3. Алгоритм работы программы микроконтроллера

Алгоритм работы программы микроконтроллера (рис. 3) следующий. После подачи питания и автоматической инициализации микроконтроллера он переходит в режим сна и ожидает команды начала измерения. После того, как кнопка начала измерения была нажата, микроконтроллер производит серию предварительных сканирований и определяет оптимальное значение срабатывания электронного затвора (максимальное значение интенсивности излучения, регистрируемого на ПЗС-линейке, оказывается во второй половине ее динамического диапазона). Далее выполняется основной цикл сканирования ПЗС-линейки,

состоящий из пяти подряд идущих циклов. Затем производится усреднение полученного результата и его передача на карту памяти или напрямую на компьютер для дальнейшей обработки. Считывание данных обычно занимает порядка одной секунды.

На рис. 4 представлена лицевая панель компьютерной программы, созданной в программной среде LabVIEW для работы со считывателем. В ее верхней половине расположены настройки, необходимые для корректной работы считывателя, в нижней отображаются считанные с ПЗС-линейки данные. Программа позволяет сохранять в файл измеренные спектры люминесценции и данные о найденных составах квантовых точек (рис. 5).

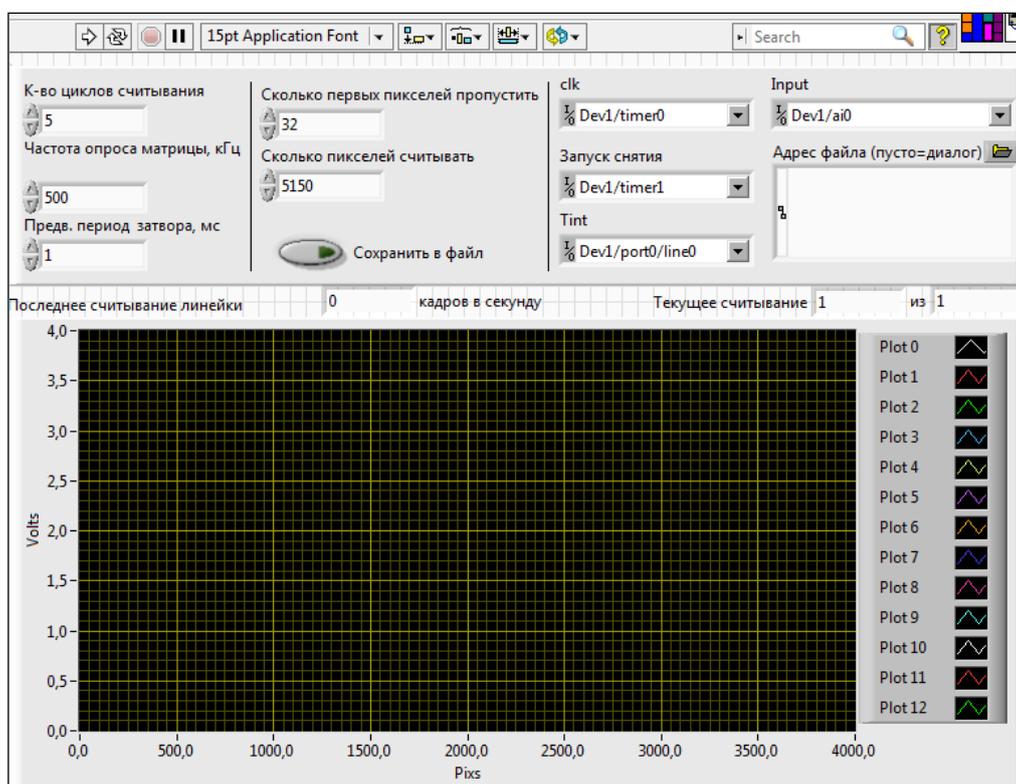


Рис. 4. Лицевая панель компьютерной программы для работы со считывателем

Длина волны	Интенсивность
534 нм	87 отн. ед.
620 нм	27 отн. ед.

Рис. 5. Файл с данными о найденных составах квантовых точек

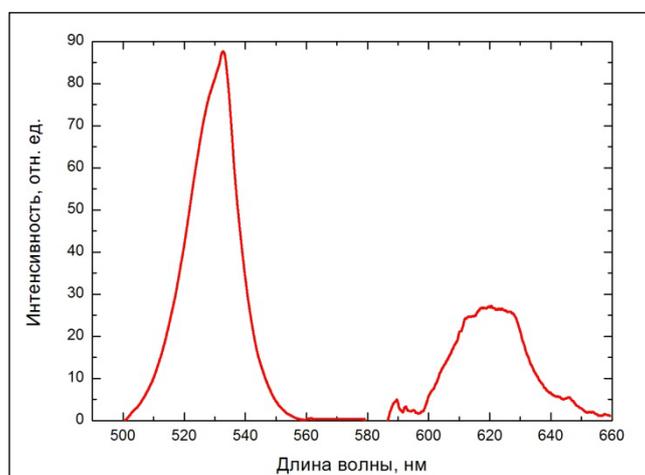


Рис. 6. Спектр люминесценции тестовой метки, измеренный с помощью прототипа считывателя

Для проверки корректности работы прототипа считывателя была проведена экспериментальная апробация люминесцентной метки на базе квантовых точек. Тестовая метка была напечатана на пористой бумаге и содержала квантовые точки CdSe/ZnS размером 2,5 нм (люминесценция в зеленой области) и 5 нм (люминесценция в красной области).

В результате были корректно обнаружены оба состава квантовых точек и правильно определены положения спектров люминесценции, находящихся в метке составов квантовых точек.

### Выводы

В результате научно-технического исследования был разработан экспериментальный образец прототипа компактного автоматизированного автономного считывателя защитных люминесцентных меток на основе квантовых точек, разработано программное обеспечение для ПК для работы со считывателем и произведено успешное испытание считывателя на экспериментальных люминесцентных двуцветных метках, созданных на базе квантовых точек CdSe/ZnS.

### Публикации

1. Златов А.С., Полищук В.А., Баранов А.В., Федоров А.В. Перспективы применения люминесцентных меток на основе наноразмерных структур для системы защитной маркировки // Сб. статей XIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (24–26 мая 2012 г., Санкт-Петербург). СПб., 2012. С. 68–72.
2. Zlatov A.S., Polischuk V.A., Baranov A.V., Fedorov A.V. Quantum dots size dispersion influence on the spectrum of fluorescence // Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference «Laser Optics – 2012» (25–29 June 2012, St. Petersburg, Russia). St. Petersburg, 2012 (1 p.).
3. Polischuk V.A., Baranov A.V., Fedorov A.V., Zlatov A.S. Spectral properties of fluorescence labels based on different sizes nanodimension-size structures // Proceedings of 44<sup>th</sup> Conference of the European Group on Atomic Systems (EGAS) (9–13 July 2012, Gothenburg, Sweden). Gothenburg, 2012. P. 199.
4. Златов А.С., Полищук В.А., Баранов А.В., Федоров А.В. Информационная емкость люминесцентных меток на основе квантоворазмерных структур // Сб. статей XIV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (4–5 декабря 2012 г., Санкт-Петербург). СПб., 2012. С. 35–38.
5. Alipieva E., Zlatov A.S., Polischuk V.A., Briukhovetskiy A.P., Grigoriev D.E. Influence of quantum dots size dispersion on the fluorescence spectrum // 17<sup>th</sup> International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications. Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8770, 87700T. P. 1–7.

### Литература

1. Zlatov A.S., Polischuk V.A., Baranov A.V., Fedorov A.V. Quantum dots size dispersion influence on the spectrum of fluorescence // Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference «Laser Optics – 2012» (25–29 June 2012, St. Petersburg, Russia). St. Petersburg, 2012 (1 p.).
2. Polischuk V.A., Baranov A.V., Fedorov A.V., Zlatov A.S. Spectral properties of fluorescence labels based on different sizes nanodimension-size structures // Proceedings of 44<sup>th</sup> Conference of the European Group on Atomic Systems (EGAS) (9–13 July 2012, Gothenburg, Sweden). Gothenburg, 2012. P. 199.
3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л., 1975. – 312 с.



**Калиниченко Александр Игоревич**  
Факультет информационных технологий и программирования  
Кафедра технологии программирования  
E-mail: alexander@kalinichenko.org

## **КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВТОМАТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ**

А.И. Калиниченко

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

### **Цели и задачи**

Для построения систем управления роботами целесообразно использовать технологию автоматного программирования, в которой, в частности, предлагается строить программу как систему автоматов, взаимодействующих между собой за счет вложенности и вызываемости. Использование автоматного подхода при создании подобных систем управления обладает рядом достоинств, таких как: документируемость, возможность построения компактных моделей Крипке в целях верификации, упрощение внесения изменений и т. д.

Целью проекта являлась разработка программно-аппаратного комплекса для изучения и разработки автоматов управления роботами. Для исследования автоматного подхода управления используется система Unimod [1]. Построение Unimod-моделей является одним из способов быстрого и простого проектирования программ на основе SWITCH-технологии [2].

Комплекс содержит:

- среду эмуляции для тестирования и отладки алгоритма управления;
- объект исследования – робот, возможность проектирования роботов и выгрузки их в эту среду;
- систему управления на основе Unimod;
- контроллер робота;
- протокол связи системы управления и контроллера робота.

Важным этапом выполнения проекта являлось исследование автоматизированного метода переноса автомата управления из среды эмуляции на контроллер реального робота.

Проект реализован в рамках движения за открытую проектную документацию [3].

### **Методы исследования**

В рамках данного проекта был создан прототип роботизированного комплекса, включающий в себя среду эмуляции Webots [4], модель робота для нее и способ проектирования и выгрузки из Solidworks [5], контроллер для управления роботом, систему управления на основе Unimod, протокол для связи системы управления на основе Unimod и контроллер управления роботом. Также был спроектирован и собран реальный прототип мобильного робота.

Создание роботизированного комплекса являлось основным этапом проекта. Следующим шагом было создание примера использования комплекса на основе алгоритмов свободного поиска и алгоритма для игры «Кегельринг», а также исследование возможности переноса синтезированного автомата управления из среды эмуляции на контроллер реального робота.

### **Калибровка модели и реального робота**

Одной из серьезных проблем, возникающих при использовании синтезированных алгоритмов, является несоответствие между моделью задачи, используемой при синтезе системы управления, и реальным миром. Автомат, отлично решающий поставленную задачу в эмуляторе, может полностью не справляться с ней в реальной среде. При разработке модели даже для такой простой задачи как «Кегельринг» невозможно учесть все внешние факторы,

влияющие на работу алгоритма: погрешности датчиков, особенности работы электродвигателей, материалы предметов, покрытие ринга и многое другое. Робот, выращенный на одной модели, должен демонстрировать работоспособность и на другой, немного отличающейся от исходной.

В этом проекте были рассмотрены возможные методы решения данной проблемы:

- обучение робота на различных моделях. Недостатком данного метода является увеличение пространства поиска, что негативно сказывается на времени работы алгоритма;
- обучение робота с зашумленными входами. Данный метод не увеличивает пространство поиска, но при этом адаптирует робота к выходу в реальный мир;
- использование генетических алгоритмов: изменение функции приспособленности в сторону меньшей зависимости от параметров среды;

В качестве одного из методов решения поставленной задачи предлагается использовать изменение типа выхода. Поясним на примере.

Первоначально при попытках обучить систему управления использовалось выходное воздействие «поворот», которое предполагало поворот робота на угол в десять градусов. Полученные автоматы использовали данное свойство, выстраивая выходные воздействия в цепочку и получая при этом поворот на необходимый угол. К сожалению, после переноса полученного автомата на реального робота оказалось, что он неработоспособен, так как осуществляемый по таймеру поворот происходил на разные углы в зависимости от условий. Избежать данного эффекта удалось, изменив тип выхода на «вращение». Вместо поворота на определенный угол робот начинал вращаться в заданном направлении. Изменение типа выхода также положительно сказалось и на сходимости алгоритма.

## Полученные результаты

### Состав комплекса

Разработанный комплекс включает в себя следующие элементы:

- среду эмуляции Webots;
- модель робота в Webots, способ проектирования и выгрузки робота из Solidworks;
- контроллер для управления роботом;
- систему управления на основе Unimode;
- протокол для связи системы управления на основе Unimode и контроллера для управления роботом;
- мобильный мини-робот.

Таким образом, комплекс позволяет выгрузить в Webots модель, спроектированную в Solidworks, разработать автомат управления в Unimode и использовать его для управления реальным роботом или виртуальной моделью в Webots, используя протокол связи контроллера и системы управления на основе Unimode.

### Модель мини-робота

В данный комплекс входят модель мини-робота, выполненная в Solidworks (рис. 1), и прототип реального робота.

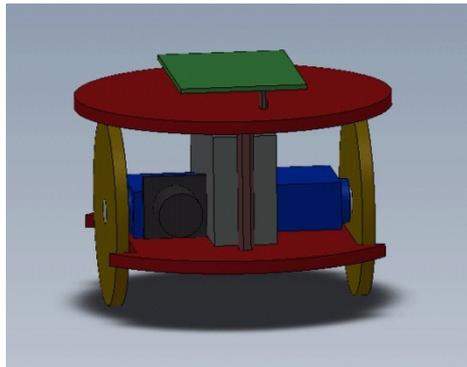


Рис. 1. 3D-модель мини-робота

Для мини-робота было спроектировано девять деталей: колесо; сервопривод; ось колеса; основание для крепления батареи, сервоприводов и опор для основания печатной платы; батарея; опора для основания печатной платы; опоры печатной платы; печатная плата и датчик. Реальный прототип двухколесного мини-робота, выполненный на основе представленной модели с использованием разработанных чертежей, изображен на рис. 2.

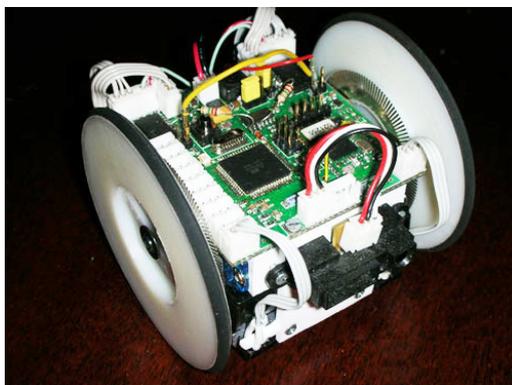


Рис. 2. Прототип двухколесного мини-робота

### Архитектура комплекса

Роботизированный комплекс построен на трехуровневой системе: реальный робот (мулятор), контроллер робота и система управления на базе Unimod. Рассмотрим, как взаимодействуют эти части между собой.

Система управления на базе Unimod состоит из трех частей: генератор событий, state машина и объект управления. Генератором событий является таймер, который генерирует событие через фиксированные промежутки времени. State машина представляет собой конечный автомат. Получив очередное событие, она выполняет переход в автомате, анализируя при этом состояние объекта управления. Фактически объектом управления является физический или виртуальный робот. Взаимодействие с ним осуществляется через контроллер с помощью разработанного протокола. Диаграмма взаимодействия элементов комплекса показана на рис. 3.

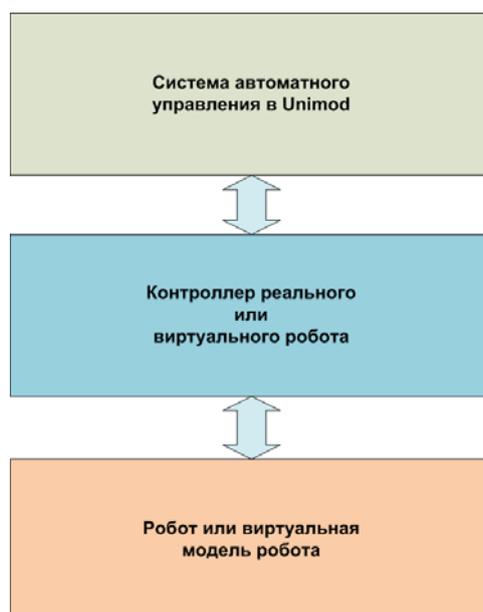


Рис. 3. Диаграмма взаимодействия элементов комплекса

### Контроллер

Специально разработанный контроллер управляет как реальным роботом, так и виртуальным. Он может считывать информацию с датчиков и управлять сервоприводами.

Контроллер является промежуточным узлом между роботом и объектом управления в системе Unimod. Он выполняет команды и отвечает на запросы о состоянии датчиков от объекта управления. Диаграмма классов контроллера представлена на рис. 4.

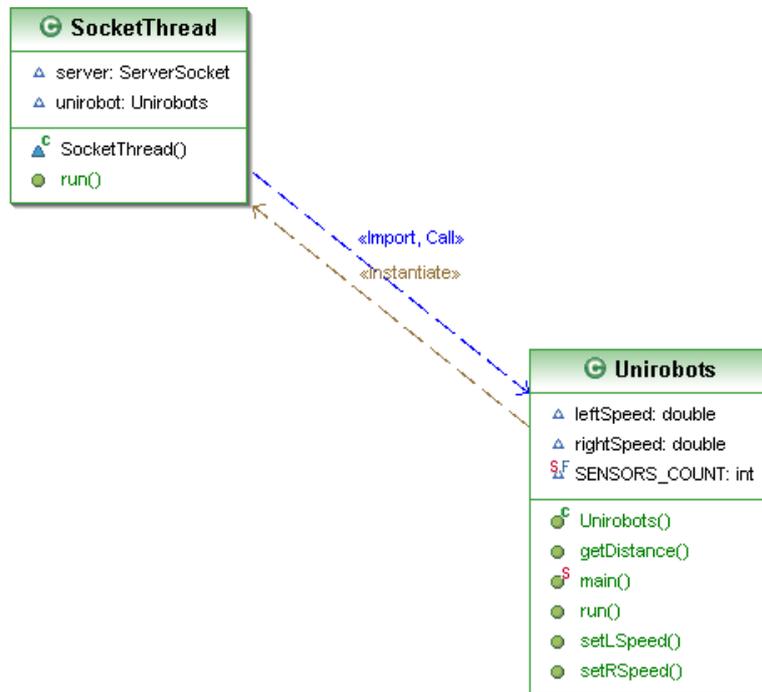


Рис. 4. Диаграмма классов контроллера

### Протокол

Для взаимодействия между контроллером робота и объектом управления в системе Unimod разработан специальный протокол. Общение происходит по системе сервер-клиент. Контроллер является сервером и ожидает подключения клиента – объекта управления. После установления соединения объект управления и контроллер начинают обмен сообщениями. Сообщения разделяются точкой с запятой. Каждое сообщение от клиента состоит из команды и параметров, разделенных пробелами. На каждое из них контроллер отправляет ответ. Если запрос или команда выполнены успешно, то в конце ответа находится слово «ОК».

В протоколе реализованы следующие сообщения:

- TEST – команда служит для проверки связи с контроллером. Ожидаемый ответ: ОК;
- setLSpeed <speed> – команда служит для установки скорости левого колеса робота. Скорость задается неотрицательным целочисленным параметром speed. Ожидаемый ответ: ОК;
- setRSpeed <speed> – команда служит для установки скорости правого колеса робота. Скорость задается неотрицательным целочисленным параметром speed. Ожидаемый ответ: ОК;
- getLEncoder – команда служит для запроса значения с энкодера левого колеса. Ожидаемый ответ: <value> ОК, где value – значение энкодера, неотрицательное целое число;
- getREncoder – команда служит для запроса значения с энкодера правого колеса. Ожидаемый ответ: <value> ОК, где value – значение энкодера, неотрицательное целое число;
- getDistance <i> – команда служит для запроса значений с датчиков. Параметром i является номер датчика. Ожидаемый ответ: <value> ОК, где value – расстояние с датчика, неотрицательное целое число;
- setLEncoder <value> – команда служит для выставления значения энкодера левого колеса. Значение задается неотрицательным целочисленным параметром value. Ожидаемый ответ: ОК;
- setREncoder <value> – команда служит для выставления значения энкодера правого колеса. Значение задается неотрицательным целочисленным параметром value. Ожидаемый ответ: ОК.

## Система управления на основе Unimod

Система управления представляет собой Unimod проект. В ее состав входят три основных элемента: генератор событий, state машина и объект управления.

Генератором событий является объект класса UnibotEvents. Он является простым таймером, генерирующим события с фиксированным интервалом времени. State машина представляется конечным автоматом, составленным на UML [6]. По событиям от таймера автомат выполняет переходы.

Для создания объектов управления был специально разработан базовый класс Unibot. В нем реализованы методы, которые являются входными и выходными воздействиями. Класс Unibot является наследником класса Webot, в котором реализовано взаимодействие с контроллером робота. Пользователь может создавать классы объектов управления, наследуя их от базового класса Unibot. Диаграмма классов для объекта управления изображена на рис. 5.

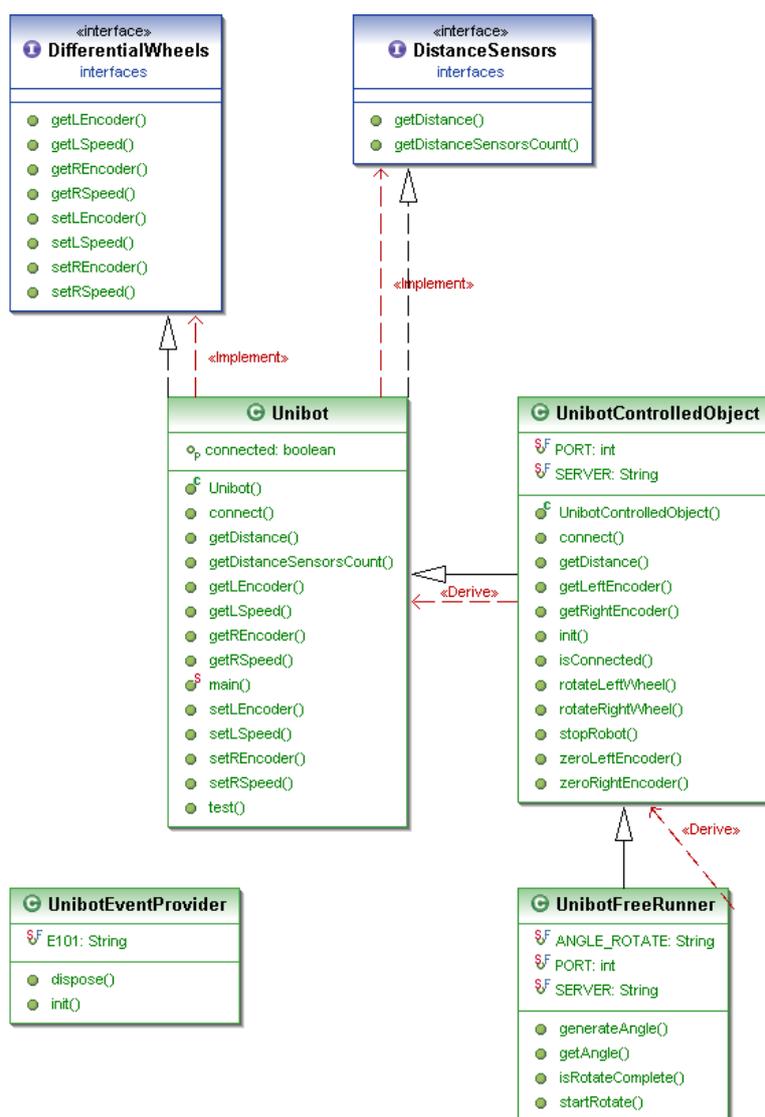


Рис. 5. Диаграмма классов объекта управления

## Пример

Для демонстрации работы комплекса был разработан алгоритм «свободного поиска». Он выполняет следующие действия: дает команду ехать вперед (устанавливает скорости колес), а во время движения опрашивает дальномер до тех пор, пока значение расстояния не изменится (впереди появится препятствие). Тогда мы останавливаем робота, поворачиваем его на случайный угол и продолжаем движение по описанному алгоритму.

В этом примере в качестве объекта управления используется объект UnibotFreeRunner класса ControlledObject, унаследованный от UnibotControlledObject, который в свою очередь

унаследован от базового класса Unibot. Базовый класс Unibot унаследован от DifferentialWheels и DistanceSensor, таким образом, это класс двухколесных роботов с дальномерами.

Для реализации данного примера в среде Webots была создана сцена, которая представляет собой квадратную комнату с четырьмя стенами. Внутри нее расставлено пять препятствий и добавлена модель робота, спроектированная в Solidworks (рис. 6).

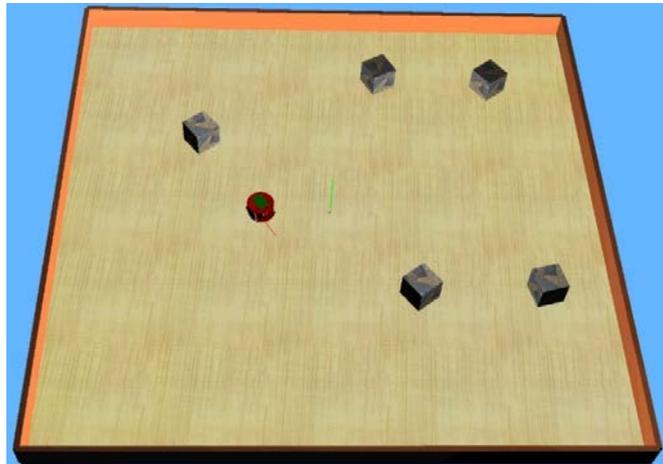


Рис. 6. Сцена в среде Webots для алгоритма свободного поиска

Схема связей в виде диаграммы классов представлена на рис. 7. На ней представлены поставщик событий *p1*, автомат *A1* и объект управления *o1*.

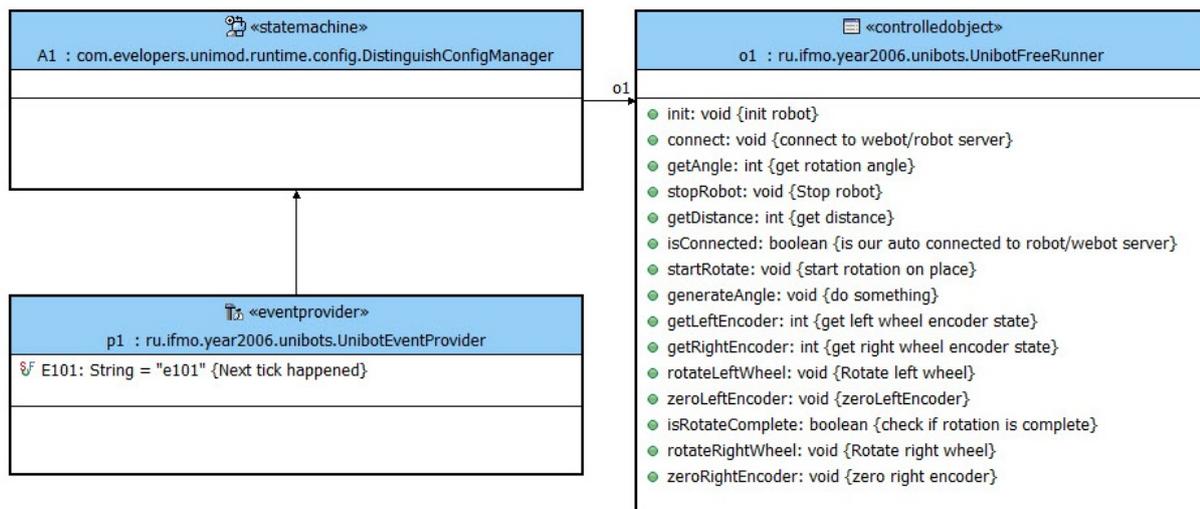


Рис. 7. Диаграмма классов контроллера

Поставщик событий *p1* инициирует по таймеру событие *e101*, которое инициируется раз в 100 мс. Объект управления *o1* предоставляет входные и выходные воздействия, связанные с поведением робота.

Входные воздействия объекта управления *o1*:

- *getAngle* – случайный угол, на который надо повернуться;
- *getDistance* – показание дальномера;
- *isConnected* – истина, если мы подключились к контроллеру робота;
- *getLeftEncoder* – значение левого энкодера;
- *getRightEncoder* – значение правого энкодера;
- *isRotateComplete* – истина, если робот закончил поворот.

Выходные воздействия объекта управления *o1*:

- *init* – инициализировать робота;
- *connect* – подключиться к контроллеру робота;
- *stopRobot* – остановить робота;

- startRotate – начать поворот;
- generateAngle – сгенерировать случайное значение;
- rotateLeftWheel – крутить левое колесо;
- zeroLeftEncoder – обнулить энкодер левого колеса;
- rotateRightWheel – крутить правое колесо;
- zeroRightEncoder – обнулить энкодер правого колеса.

A1 – автомат, управляющий роботом (рис. 8). В автомате A1 мы находимся в состоянии connection, пока не подключимся к контроллеру робота. Затем переходим в состояние goStraight (включаем оба двигателя). Находимся в нем, пока показание датчика больше или равно 900. Если меньше, то переходим в состояние Rotation и генерируем случайное значение поворота, обнуляем энкодеры и начинаем поворот. Находимся в этом состоянии, пока не закончится поворот, после чего переходим в состояние goStraight (включаем оба двигателя).

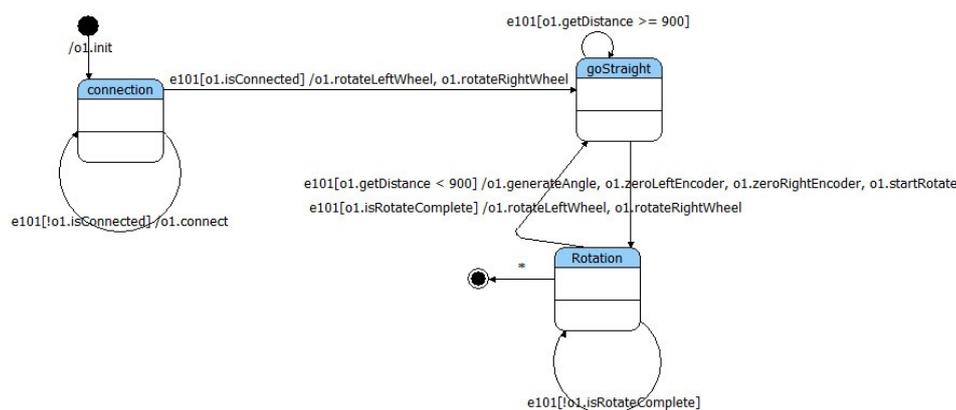


Рис. 8. Автомат управления роботом

### Области возможного использования результатов

Результаты исследования могут быть использованы для разработки, отладки и исследования автоматов управления роботами. Роботы активно используются при поисково-спасательных работах, на производстве и даже в быту (например, роботы-пылесосы).

Данный комплекс также может быть использован для обучения автоматному программированию и робототехнике в школах и вузах.

### Публикации

1. Алексеев С.А., Калиниченко А.И., Клебан В.О., Шалыто А.А. Автоматический синтез системы управления мобильным роботом для решения задачи «КЕГЕЛЬРИНГ» // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 2 (72). С. 26–31.
2. Калиниченко А.И., Шалыто А.А. Автоматический синтез системы управления мобильным роботом для решения задачи «Кегельринг» // Сб. тезисов 4-ой Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ – 2011). Волгоград, 2011. С. 177–180.

### Литература

1. Инструментальное средство Unimod: <http://unimod.sourceforge.net/intro.html>.
2. Шалыто А.А. SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб., 1998. – 628 с. (<http://is.ifmo.ru/books/switch/1>).
3. Шалыто А.А. Новая инициатива в программировании. Движение за открытую проектную документацию // Мир ПК. 2003. № 9. С. 52–56 ([http://is.ifmo.ru/works/open\\_doc](http://is.ifmo.ru/works/open_doc)).
4. Туку Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. СПб., 2005. – 768 с.
5. Cyberbotics Ltd. Webots reference manual (2009): <http://www.cyberbotics.com/cdrom/common/doc/webots/reference/>.
6. Гуров В.С., Мазин М.А., Нарвский А.С., Шалыто А.А. UML. SWITCH-технология. Eclipse // Информационно-управляющие системы. 2004. № 6. С. 12–17 (<http://is.ifmo.ru/works/uml-switch-eclipse>).



**Коняхин Алексей Игоревич**  
**Факультет оптико-информационных систем и технологий**  
**Кафедра оптико-электронных приборов и систем**  
**E-mail: aligkon@yandex.ru**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТРЕХМЕРНОГО ИЗГИБА НЕФТЕПРОВОДОВ

А.И. Коняхин

Научный руководитель – доцент А.Н. Тимофеев

### Введение

Магистральные трубопроводы для перекачки нефти или природного газа, а также резервуары для хранения нефти являются экологически опасными объектами.

Основным показателем, лежащим в основе оценки прочности, прогнозирования надежности и безопасности эксплуатируемых трубопроводных систем является напряженно-деформированное состояние труб и несущих конструкций. Сезонные подвижки грунтов, морозное вспучивание, циклические подмерзания, оползни и другие неконтролируемые природные явления могут привести к возникновению критического уровня напряженно-деформированного состояния в трубопроводе и к его разрушению.

Подобные проблемы типичны при хранении нефти и горючего в резервуарах. Стационарные резервуары испытывают на себе различные механические и тепловые нагрузки, как со стороны внешней среды, так и от подводящих трубопроводных устройств, и должны выдерживать их без опасных деформаций и разрушений в течение всего срока своей работы.

Указанные нагрузки приводят к деформациям изгиба и кручения компонентов трубопровода (рис. 1). В связи с этим важным вопросом является разработка и внедрение многокоординатных систем контроля пространственных угловых деформаций изгиба и кручения труб, резервуаров и несущих конструкций.



Рис. 1. Трехмерные деформации (изгибы и кручение) трубопровода

Для измерения пространственных деформаций эффективны многокоординатные оптико-электронные измерительные системы. Они включают автоколлиматор, установленный в некоторой точке контролируемой конструкции, принимаемой за базовую, и отражатель, расположенный в точке предполагаемой наибольшей пространственной деформации (рис. 1, рис. 2).

Принцип измерения состоит в определении автоколлиматором отклонений световых пучков, отраженных от контрольного элемента при его повороте вследствие угловых деформаций объекта в точке установки контрольного элемента [1].

Угловое положение объекта определено, если измерены углы между тремя ортогональными осями системы координат  $X_1Y_1Z_1$ , приданной объекту, и соответствующими осями общей системы координат  $XYZ$ , связанной с измерительной системой. При автоколлимационных измерениях на контролируемом объекте закрепляется отражатель, называемый также контрольным элементом (КЭ), напротив него на неподвижной базе устанавливается автоколлиматор (АК). При этом визирная ось АК, связанного с пространственной системой координат, должна совпадать с осью симметрии КЭ и одновременно быть направлена ей навстречу. В этом случае угол поворота отражателя вследствие деформаций кручения объекта вокруг визирной оси  $OZ$  прибора называют углом скручивания (крена)  $\Theta_3$ , а углы поворота, характеризующие деформации изгиба вокруг перпендикулярных им осей  $OX, OY$  – коллимационными углами  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  (рис. 2). Метрологическая задача определения деформаций кручения и изгиба как трехмерных сводится к измерению этих трех углов.

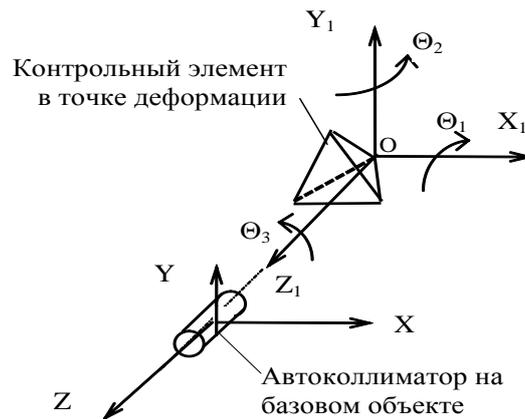


Рис. 2. Системы координат при угловых многокоординатных измерениях с использованием оптико-электронного автоколлиматора

Целью научной работы является теоретическое и экспериментальное исследование трехкоординатных оптико-электронных систем измерения деформаций пространственного изгиба и кручения элементов конструкций объектов в трубопроводном транспорте, промышленности и энергетике (в том числе и представляющих экологическую опасность в случае выхода из строя составляющих их компонентов), а также разработка принципов построения таких систем, методов расчета параметров и характеристик их компонентов.

Основные проблемы реализации трехкоординатных автоколлимационных систем при измерении деформаций крупногабаритных объектов

Разработанные трехкоординатные автоколлиматоры построены по оптической схеме с единым коллиматором (рис. 3). Они включают автоколлиматор для измерения коллимационных углов  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  в составе: точечной излучающей марки 1, объектива 2, отражателя 3, фотоприемной матрицы 4 и дополнительный приемный канал для измерения угла скручивания (поворота относительно оптической оси объектива автоколлиматора) в составе объектива 5 и фотоприемной матрицы 6.

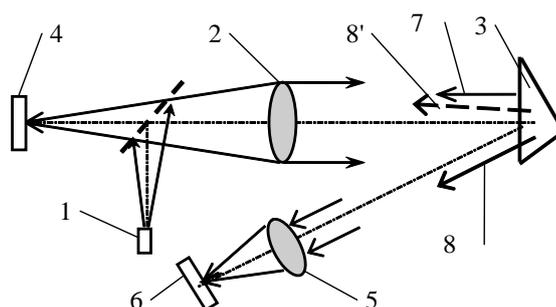


Рис. 3. Структура трехкоординатного автоколлиматора

Отражатель 3 автоколлиматора выполнен в виде призмного уголкового отражателя, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют малые отклонения от прямого. Часть 7 пучка автоколлиматора отражается от преломляющей грани отражателя 3 как от автоколлимационного зеркала и формирует изображение марки на фотоприемной матрице 4; второе изображение марки, созданное основной частью пучка 8 после его отражения от внутренних граней отражателя 3, регистрируется матрицей 6.

При поворотах контролируемого объекта пучки 7 и 8 отклоняются от исходного направления, что приводит к пропорциональному смещению формируемых ими изображений.

После измерения величин смещений с помощью матричных ПЗС (или КМОП) фотоприемников 4 и 6, сопряженных с микропроцессорами обработки видеок кадров, при известном фокусном расстоянии объектива определяются измеряемые углы поворота.

Известны также трехкоординатные системы с полностью разделенными оптическими схемами каналов измерения коллимационных углов и угла скручивания. Фактическое использование двух различных отражательных систем (входной и отражающих граней уголкового отражателя) значительно усложняет структуру автоколлиматора. Вследствие виньетирования пучка 7, отраженного от входной грани как автоколлимационного зеркала, рабочая дистанция не превышает 1–3 м, что недостаточно для решения задач контроля крупногабаритных объектов [1].

При определенных параметрах призмного уголкового отражателя как пучок 7 для измерения коллимационных углов, так и пучок 8' для измерения угла скручивания формируются его отражающими гранями. При этом чувствительность пучка 7 к поворотам значительно меньше, чем при отражении от плоского зеркала, что позволяет практически устранить влияние виньетирования, а пучок 8' (обозначен штриховой линией на рис. 3) отклонен от оптической оси объектива на малый угол и для его приема может использоваться объектив 2 автоколлиматора.

В результате поля анализа изображений, соответствующие различным измерительным каналам, совмещаются на одной фотоприемной матрице 4, что значительно упрощает оптическую схему трехкоординатного автоколлиматора и расширяет его метрологические возможности, в частности, позволяет увеличить дистанцию измерения до 20–30 м.

Таким образом, автоколлиматор с отражателем в форме трехгранного угла позволяет выполнять измерения угловых деформаций относительно трех осей на дистанциях, соизмеримых с размерами топливных резервуаров или длинных секций трубопроводов.

После анализа недостатков известных автоколлимационных систем были определены следующие направления деятельности:

1. Теоретическое исследование конфигурации отражательных систем, использование которых в качестве отражателя при автоколлимационных измерениях позволяет определить как коллимационные углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  деформаций изгиба относительно осей  $OX, OY$ , так угол скручивания  $\theta_3$  при деформации кручения относительно оси  $OZ$ .

2. Анализ соотношений между параметрами отражателя, обеспечивающими минимизацию погрешностей измерения, возникающих в результате взаимного влияния каналов измерения коллимационных углов и угла скручивания.

3. Проектирование, реализация и экспериментальное исследование отражательных систем со свойствами указанными выше.

Теоретическое исследование отражательных систем для измерения коллимационных углов (изгибов) и угла скручивания (деформации кручения)

#### **Общий алгоритм автоколлимационных измерений**

Согласно алгоритму автоколлимационных измерений орт отраженного пучка **B** выражается произведением матрицы прямого преобразования  $M_r$ , описывающей переход от пространственной системы координат  $X_1Y_1Z_1$ , приданной объекту и связанной с отражателем, к соответствующим осям общей системы координат  $XYZ$ , связанной с измерительной системой; матрицы действия отражателя  $M_d$ , описывающей формирование отраженного пучка;

матрицы обратного преобразования  $M_r^T$ , описывающей обратный переход от системы координат отражателя к общей системе координат и орта падающего пучка  $A$  (рис. 4):

$$B = M_r \cdot M_d \cdot M_r^T \cdot A. \tag{1}$$

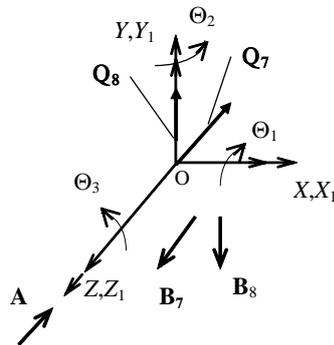


Рис. 4. Каноническое расположение определяющих векторов

Орт  $A$ , с учетом принятого исходного направления падающего пучка против оси  $OZ_1$  определяется матрицей:

$$A = [0; 0; -1]^T. \tag{2}$$

Рассмотренный алгоритм подтверждает необходимость исследования свойств отражающих зеркально–призменных систем, используемых для построения отражателя и оптимизацию их матриц действия  $M_d$ .

Матрица преобразования координат  $M_r$  выражается через углы трех последовательных поворотов системы  $X_1 Y_1 Z_1$  относительно своих координатных осей и может быть задана в виде произведения трех матриц, каждая из которых описывает поворот на угол  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  (коллимационные углы) или  $\Theta_3$  (угол скручивания) относительно одной оси (индексы в обозначении углов соответствуют индексу оси поворота). Вид матрицы для рассматриваемых углов приведен в литературе [1, 2, 3]:

$$M_r = \begin{pmatrix} \cos(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3) & -\cos(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3) & \sin(\Theta_2) \\ \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_3) + \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3) & \cos(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_3) - \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3) & -\sin(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_2) \\ \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_3) - \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3) & \sin(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_3) + \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3) & \cos(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_2) \end{pmatrix} \tag{3}$$

Для исследования отражателей трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем используем теорию «инвариантных осей» (другой вариант термина – основное неизменное направление).

### Обобщенный вид матрицы преобразования координат

Для уменьшения погрешности, возникшей вследствие взаимного влияния измеряемых углов, инвариантные оси трехгранного зеркала, соответствующие матрицам действия  $M_7$ ,  $M_8$  для пучков 7 и 8, должны быть взаимно-перпендикулярны и совпадать соответственно с осями  $O_1 Y_1$  и  $O_1 Z_1$  [1, 2]. Матрицы действия отражателя для двух рассматриваемых пучков при этом имеют вид:

$$M_7 = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & -\sin(\omega) & 0 \\ \sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \tag{4}$$

$$M_8 = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & 0 & \sin(\omega) \\ 0 & -1 & 0 \\ -\sin(\omega) & 0 & \cos(\omega) \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где  $\omega$  – угол поворота пучка относительно инвариантной оси при отражении.

При малых величинах отклонения двугранных углов трехгранного зеркала от прямого с каждой инвариантной осью может быть связан вектор  $\mathbf{Q}$ , определяющий угол  $\omega$  поворота пучка как:

$$\omega \approx \pi - 2 \cdot |\mathbf{Q}| \quad (6)$$

Тогда матрицы действия трехгранного зеркала при малой величине модуля  $\mathbf{Q}$  определяются выражениями:

$$M_7 = \begin{bmatrix} -1 & -2 \cdot |\mathbf{Q}| & 0 \\ 2 \cdot |\mathbf{Q}| & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$M_8 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 \cdot |\mathbf{Q}| \\ 0 & -1 & 0 \\ -2 \cdot |\mathbf{Q}| & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Составляющие ортов отраженных пучков  $\mathbf{B}_7$  и  $\mathbf{B}_8$  определяются при подстановке матриц (7) и (8) в алгоритм (1) при условии (2) осевого падения пучка автоколлиматора на отражатель:

$$B_{7x} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_2; \quad B_{7y} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_1; \quad B_{8x} \approx 2 \cdot |\mathbf{Q}|; \quad B_{8y} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_3 \quad (9)$$

Также формируются и пучки с обратной последовательностью отражений. Выражения для составляющих их ортов  $\mathbf{B}_7$ ,  $\mathbf{B}_8$  находятся аналогично при подстановке в алгоритм (1) матриц, в которых элементы, не лежащие на главной диагонали, имеют знаки, противоположные указанным в выражениях (7) и (8). Для измерений может использоваться любая пара пучков или, в зависимости от алгоритма обработки изображения, обе сразу.

Как следует из выражений (9), три угла измеряются независимо друг от друга, причем чувствительность по коллимационным углам, пропорциональна величине модуля  $2 \cdot |\mathbf{Q}|$  определяющего вектора и, следовательно, значительно меньше, чем при измерениях по автоколлимационному зеркалу.

Определим общие условия реализации матриц действия трехгранного зеркала вида (7), (8). Пусть углы между гранями трехгранного зеркала (соответственно, 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1) отличаются на величины  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\delta_3$  от  $90^\circ$  (рис. 5). Составляющие определяющих векторов  $\mathbf{Q}_7$ ,  $\mathbf{Q}_8$  (рис. 4) для пучка 7 с последовательностью отражения от граней 2-1-3 и соответственно пучка 8 с последовательностью отражения 1-2-3 задаются в [2]. Значения составляющих для обратных последовательностей отражения имеют противоположные знаки.

Зададим соотношения между величинами  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  как  $\delta_2 = \delta$ ,  $\delta_1 = k_1 \cdot \delta$ ,  $\delta_3 = k_2 \cdot \delta$ , где  $k_1$ ,  $k_2$  – некоторые коэффициенты. Приравняв нулю скалярное произведение определяющих векторов  $\mathbf{Q}_7$ ,  $\mathbf{Q}_8$ , найдем соотношение между коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$ , при котором инвариантные оси будут перпендикулярны:

$$k_2^2 - k_1^2 + 1 = 0. \quad (10)$$

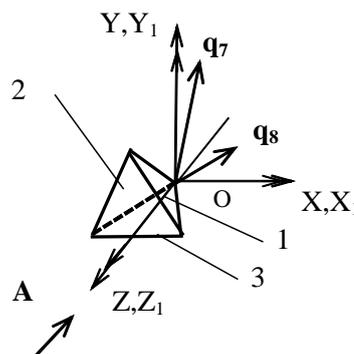


Рис. 5. Параметры отражателя в виде трехгранного зеркала

Модуль определяющих векторов при условии (10) определяется выражением:

$$|Q| = \delta \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{k^2 + 1}. \quad (11)$$

Для совмещения определяющих векторов  $Q_7$ ,  $Q_8$  инвариантных осей с координатными осями  $O_1Y_1$  и  $O_1Z_1$  необходимо повернуть трехгранное зеркало относительно исходного положения на некоторые начальные углы  $\Xi_1$ ,  $\Xi_2$ ,  $\Xi_3$  относительно соответствующих осей координат.

Величины начальных углов определяются из уравнений:

$$(0 \ 0 \ -1)^T = M_{\Xi} \cdot (q_{7x} \ q_{7y} \ q_{7z})^T; \quad (12)$$

$$(0 \ 1 \ 0)^T = M_{\Xi} \cdot (q_{8x} \ q_{8y} \ q_{8z})^T, \quad (13)$$

где  $q_7 = Q_7 / |Q|$ ,  $q_8 = Q_8 / |Q|$  – орты определяющих векторов  $Q_7$ ,  $Q_8$  (рис. 5);  $M_{\Xi}$  – матрица поворота, определяемая выражением:

$$M_7 = \begin{pmatrix} \cos(\Xi_2) \cdot \cos(\Xi_3) & -\cos(\Xi_2) \cdot \sin(\Xi_3) & \dots \\ \cos(\Xi_3) \cdot \sin(\Xi_1) \cdot \sin(\Xi_2) + \cos(\Xi_1) \cdot \sin(\Xi_3) & \cos(\Xi_1) \cdot \cos(\Xi_3) - \sin(\Xi_1) \cdot \sin(\Xi_2) \cdot \sin(\Xi_3) & \dots \\ \sin(\Xi_3) \cdot \sin(\Xi_1) - \cos(\Xi_1) \cdot \cos(\Xi_3) \cdot \sin(\Xi_2) & \cos(\Xi_1) \cdot \sin(\Xi_2) \cdot \sin(\Xi_3) + \cos(\Xi_3) \cdot \sin(\Xi_1) & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots & \sin(\Xi_2) \\ \dots & -\cos(\Xi_2) \cdot \sin(\Xi_1) \\ \dots & \cos(\Xi_1) \cdot \cos(\Xi_2) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Система из трех уравнений, выбранных из блоков (12), (13), решается численными методами в технологии Mathcad при различных значениях коэффициента  $k_2$ . Некоторые результаты расчета, позволяющие задать матрицы действия (7), (8) отражателя, а также ориентировать его апертуру относительно падающего пучка приведены в [2].

Следует отметить два особенных варианта:

- аналитическое решение ( $k_2 = -1$ ,  $k_1 = \sqrt{2}$ ,  $\Xi_1 = \arctg(3 - 2\sqrt{2})$  ( $9^\circ 50'$ ),  $\Xi_2 = 0$ ,  $\Xi_3 = 0$ ,  $|Q| = 2 \cdot \delta$ ) при котором потери светового потока, вызванные наклоном отражателя минимальны;
- решение, соответствующее  $k_2 = 0$ , определяющее оригинальный отражатель с отклонением от прямого только двух углов трехгранного зеркала.

Соотношения между параметрами отражателей в виде трехгранных зеркал, найденные по рассмотренной методике, позволяют выполнить практический расчет различных отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем.

### Проектирование экспериментального образца трехкоординатного автоколлиматора с триэдрическим отражателем

Триэдрический отражатель (рис. 6) спроектирован с использованием приведенных выше соотношений. Также разработан и изготовлен макет трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора. Его параметры: фокусное расстояние объектива 250 мм при относительном отверстии 1:6; марка – полупроводниковый излучающий диод SFH 485 P (Siemens) с мощностью излучения 10 мВт с диафрагмой диаметром 0,3 мм; анализатор – КМОП матрица OV5610 Color CMOS QSXGA (5.17 Mpixel) с размером пикселя  $2,8 \times 2,8$  мкм.

Контрольный элемент – стеклянный тетраэдр с апертурой световым диаметром 40 мм (по вписанной окружности), углы между отражающими гранями которого имеют отклонения от  $90^\circ$ , рассчитанные по соотношениям (10), (11) при  $\delta = 0,5^\circ$  (рис. 6) [3].

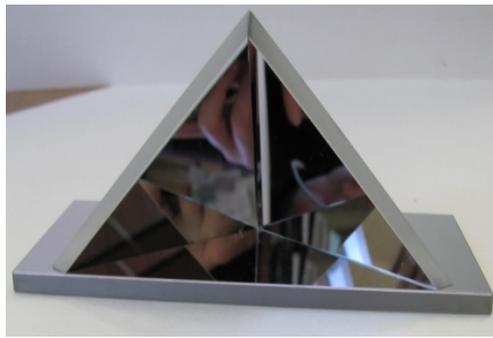


Рис. 6. Разработанный триэдрический отражатель для трехкоординатных автоколлимационных измерений

Эксперименты проводились на дистанции между отражателем и автоколлиматором, равной 8300 мм.

Экспериментальные исследования свойств триэдрического отражателя при автоколлимационных измерениях

В ходе экспериментов с целью определения метрологических характеристик автоколлимационных измерений с использованием разработанного отражателя снимались статические характеристики автоколлиматора по всем трем углам  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  его поворота. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 7.

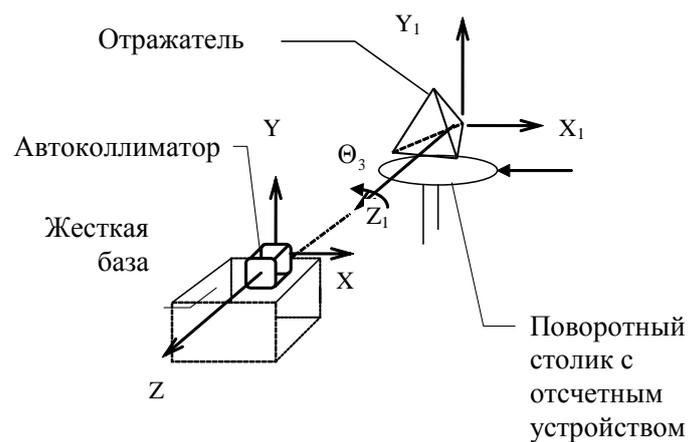


Рис. 7. Структура экспериментальной установки

В первой части эксперимента определялась погрешность измерения угла скручивания  $\theta_3$ . Для этого снималась статическая характеристика автоколлиматора с исследуемым отражателем. Ее предварительный вид представлен на рис. 8, где по оси ординат откладывается координата изображения, сформированного отраженным пучком в плоскости анализа матричного фотоприемника, измеренная в количестве элементов матрицы, а по оси абсцисс – угол поворота отражателя в угловых секундах.

Для анализа реализуемой точности в заданном диапазоне измерения эта зависимость преобразовывалась к виду, показанному на рис. 9, где нулевому углу поворота соответствует условная нулевая координата изображения.

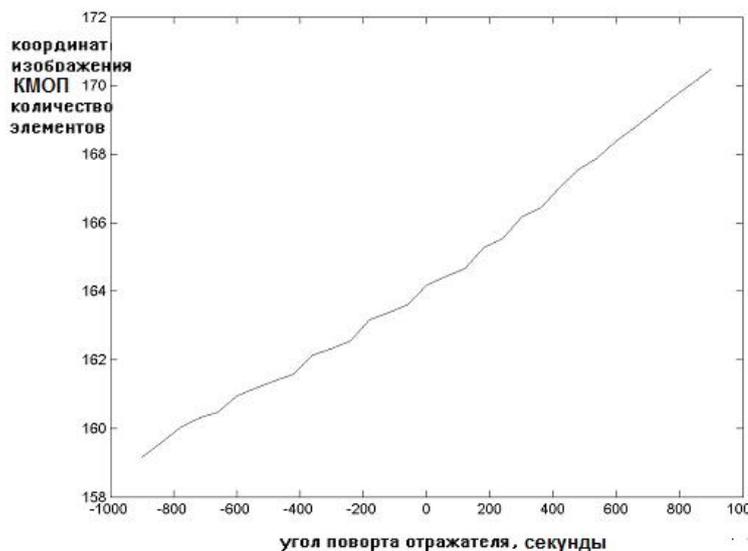


Рис. 8. Предварительный вид статической характеристики автоколлиматора по углу скручивания

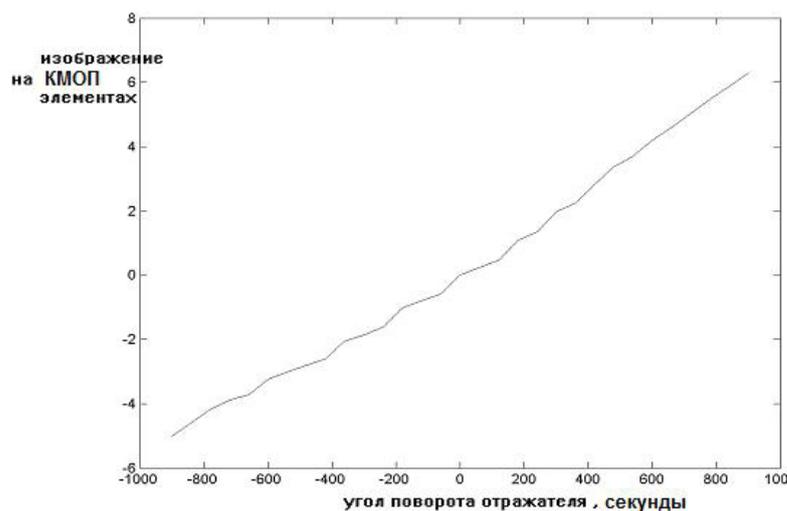


Рис. 9. Вид статической характеристики, приведенной к началу отсчетной базы матричного анализатора

Далее координаты изображения на матрице пересчитывались в величины измеряемого угла с учетом параметров отражателя и фокусного расстояния объектива автоколлиматора. Полученная статическая характеристика (с аппроксимирующей прямой) изображена на рис. 10.

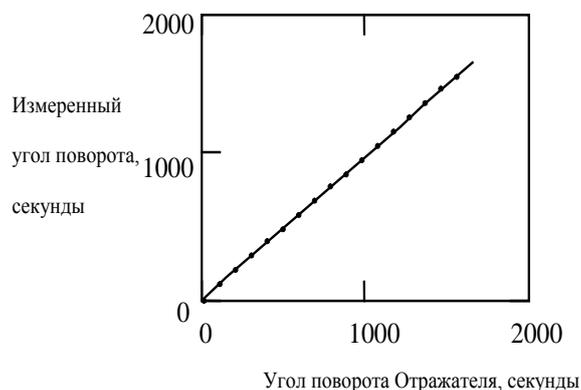


Рис. 10. Статическая характеристика автоколлиматора по скручиванию

Погрешность измерения угла скручивания может быть оценена как величина среднего квадратического отклонения экспериментальных точек от линейной аппроксимации статической характеристики. Поле рассеяния экспериментальных точек изображено на рис. 11. В соответствии с данными этого рисунка погрешность измерения угла скручивания составляет 6 угл. сек.

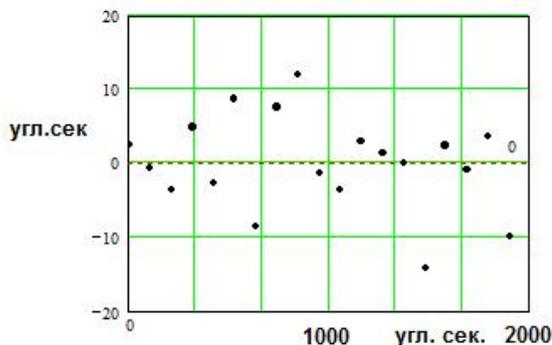


Рис. 11. Рассеяние экспериментальных точек

Эксперименты по снятию статической характеристики по коллимационным углам проводились по аналогичной методике. В частности, по коллимационному углу  $\Theta_2$  график полученной статической характеристики (с линейной аппроксимацией) изображен на рис. 12.

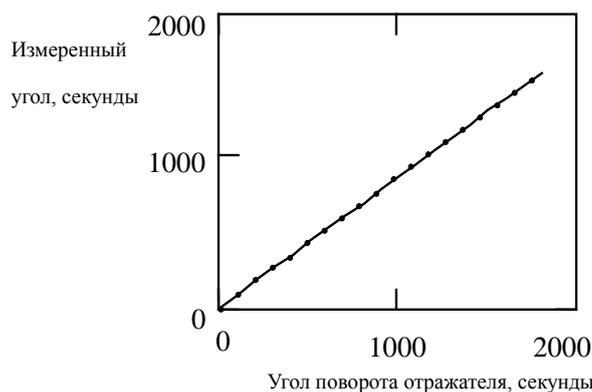


Рис. 12. Статическая характеристика по коллимационному углу

Погрешность измерения коллимационного угла также может быть оценена как величина среднего квадратического отклонения экспериментальных точек от линейной аппроксимации статической характеристики (рис. 13). Для коллимационного угла она составляет 12 угл. сек.

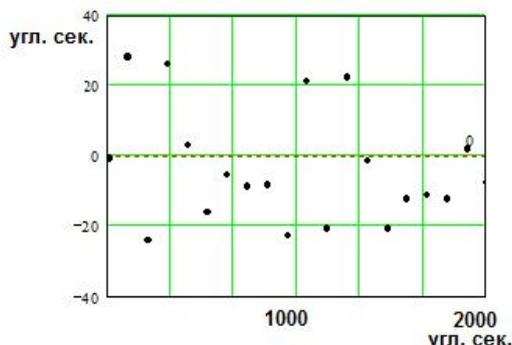


Рис. 13. Поле рассеяния экспериментальных точек при измерениях коллимационного угла

В результате экспериментов подтвержден линейный характер статической характеристики автоколлиматора с триэдрическим отражателем. Трехкоординатные угловые измерения реализованы с использованием синтезированного отражателя при практическом (в пределах точности эксперимента) отсутствии взаимного влияния каналов измерения коллимационных углов и угла скручивания.

Получены следующие метрологические характеристики автоколлиматора, использующего триэдрический отражатель:

- среднее квадратическое значение погрешности измерения угла скручивания  $\Theta_3$  составило 6 угл. сек в диапазоне измерения 32 угл. мин;
- среднее квадратическое значение погрешности измерения коллимационного угла  $\Theta_2$  составило 12 угл. сек в диапазоне измерения 32 угл. мин.

Указанные величины были получены при дистанции измерения 8,3 м, что позволяет сделать вывод о возможности измерения трехмерных деформаций протяженных объектов с требуемой точностью на дистанциях до 20 м.

Результаты экспериментов подтвердили правильность разработанных принципов построения и методик расчета параметров отражателей автоколлимационных систем для измерения трехмерных деформаций изгиба и кручения крупногабаритных и протяженных объектов.

Внедрение в практическое использование результатов исследований позволит увеличить достоверность мониторинговых наблюдений деформаций кручения и изгиба секций трубопроводов и нефтяных резервуаров с целью повышения техноферной безопасности при их эксплуатации.

### Направления дальнейших исследований

В дальнейшем предполагается выполнить анализ триэдрических контрольных элементов с коническими отражающими поверхностями. Такой контрольный элемент включает две плоские отражающие поверхности – 1 и 2 и одну отражающую поверхность в виде фрагмента конуса – 3 (рис. 14).

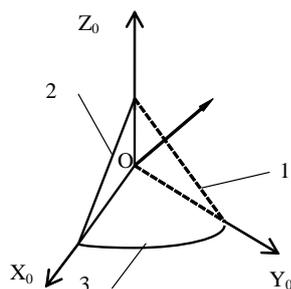


Рис. 14. Конфигурация триэдрического отражателя

Предварительный анализ показывает, что триэдрический отражатель с конической отражающей гранью позволяет проводить измерения углов поворота при взаимном перемещении базового и контролируемого объектов в процессе измерения. Его использование позволит выполнять измерения трехмерных деформаций труб во многих точках, расположенных на различных дистанциях вдоль линии газо- и нефтепроводов.

### Заключение

Получены следующие теоретические и практические результаты.

1. Отражатель для трехкоординатных автоколлимационных измерений пространственных деформаций должен быть эквивалентен двум зеркальным триэдрам, инвариантные направления которых должны быть взаимно-перпендикулярны, причем инвариантное направление одного из эквивалентных триэдров должно совпадать с осью скручивания, а второго – с одной из коллимационных осей.

2. Для уменьшения взаимного влияния измерительных каналов и повышения точности измерений отражатель должен быть установлен в исходное положение, определяемое тремя найденными углами поворота относительно трех базовых осей измерительной системы.

3. Найденны соотношения между отклонениями трех двугранных углов между отражающим гранями триэдра от  $90^\circ$ . Они позволяют спроектировать и реализовать отражатель для практических измерений трехкоординатных угловых деформаций.

4. Выполнены экспериментальные исследования трехкоординатного автоколлиматора использующего спроектированный триэдрический отражатель, подтвердившие правильность полученных теоретических положений

5. Полученные результаты позволяют разработать трехкоординатные оптико-электронные системы измерения деформаций, позволяющие увеличить достоверность мониторинговых наблюдений деформаций кручения и изгиба секций трубопроводов и нефтяных резервуаров.

### Публикации

1. *Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Konyakhin A.I.* Three-axis optic-electronic autocollimation system for the inspection of large-scale objects // SPIE Proceedings. Vol. 8788. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, 87882C (May 13, 2013). – 8 p.
2. *Коняхин А.И., Молев Ф.В., Тимофеев А.Н.* Синтез отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем // Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 21–26.
3. *Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I., Smekhov A.A.* Optic-electronic systems for measurement the three-dimension angular deformation of axles at the millimeter wave range radiotelescope // SPIE Proceedings. Vol. 8759. Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, 87593E (January 31, 2013). – 7 p.

### Литература

1. *Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Konyakhin A.I.* Three-axis optic-electronic autocollimation system for the inspection of large-scale objects // SPIE Proceedings. Vol. 8788. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, 87882C (May 13, 2013). – 8 p.
2. *Коняхин А.И., Молев Ф.В., Тимофеев А.Н.* Синтез отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем // Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 21–26.
3. *Konyakhin I.A., Kopylova T.V., Konyakhin A.I., Smekhov A.A.* Optic-electronic systems for measurement the three-dimension angular deformation of axles at the millimeter wave range radiotelescope // SPIE Proceedings. Vol. 8759. Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, 87593E (January 31, 2013). – 7 p.



**Кудашев Олег Юрьевич**  
**Факультет информационных технологий и программирования**  
**Кафедра речевых информационных систем**  
**E-mail: oleg-kudashov@yandex.ru**

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ДИКТОРОВ НА ФОНОГРАММЕ**

О.Ю. Кудашев

Научный руководитель – доцент Т.С. Пеховский

### Введение. Цели и задачи проекта.

Задача разделения дикторов на фонограмме состоит в выделении речевых сегментов фонограммы и кластеризации (объединении) выделенных сегментов в соответствии с принадлежностью одному диктору. Эта задача является важной и неотъемлемой

составляющей систем автоматической обработки речи, к которым в первую очередь следует отнести системы автоматического распознавания дикторов по голосу.

Указанная задача может быть разделена на два типа в зависимости от наличия априорной информации о числе дикторов. В случае наличия таковой – задача существенно упрощается. Однако, на практике так бывает не часто. Например, в одном канале стереозаписи телефонного разговора могут присутствовать: факт передачи трубки или автоответчик. Таким образом, фонограммы с монозаписью телефонных переговоров могут одновременно содержать голоса от двух до пяти дикторов. Примером также могут служить аудиозаписи совещаний, конференций, радио- и телевещаний.

Цель проекта состоит в разработке системы разделения дикторов на фонограмме, способной работать в условиях, когда число дикторов заранее не известно.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Подготовить акустические базы для обучения и тестирования методов разделения дикторов на фонограмме.

2. Разработать метод разделения голосов дикторов на фонограмме при условии, что их число заранее не известно. Метод должен быть основан на последних достижениях в области тексто-независимой идентификации дикторов по голосу. Они включают в себя применение факторного анализа в пространстве «полной изменчивости» для создания генеративной модели диктора и линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis, LDA) для компенсации внутрдикторской и канальной вариативности [1, 2]. Кроме этого, целесообразно применить известный метод алгомеративной кластеризации [3], позволяющий определять число дикторов, записанных на фонограмме.

3. Провести численные эксперименты, позволяющие оценить уровень ошибки разработанной системы и сравнить его с уровнем ошибки существующих аналогов.

4. Разработанный метод должен быть реализован в программном коде языка программирования C++ с использованием математических библиотек IPP, Intel MKL.

### Построение голосовой модели диктора

Методы, применяемые в большинстве базовых систем разделения дикторов на фонограмме, определяют параметры голосовых моделей дикторов, используя только локальные данные фонограммы [4, 5]. Как показано в работе [6], использование априорной информации значительно увеличивает надежность как таких систем, так и систем распознавания дикторов по голосу. Применение UBM (Universal Background Model) и факторного анализа в пространстве «полной изменчивости» (Total Variability, TV) позволяют использовать такую информацию. В этом случае генеративная модель диктора представляет собой смесь гауссовых распределений (Gaussian Mixture Model, GMM), полученную путем MAP-оценки (Maximum-a-Posteriori Estimation) средних значений гауссоид UBM:

$$s = \mu + Tw, \quad (1)$$

где  $s$  – супервектор средних GMM диктора;  $\mu$  – супервектор средних UBM;  $T$  – прямоугольная низкоразмерная матрица, определяющая пространство «полной изменчивости»;  $w$  – низкоразмерный случайный вектор скрытых параметров (факторов), имеющий нормальное стандартное распределение.

Данный подход позволяет не только выделять наиболее информативные характеристики голосов дикторов, но и значительно уменьшить количество данных, необходимых для построения их модели.

### Сравнение моделей

Для сравнения голосовых моделей дикторов используется множество различных метрик. Среди них можно отметить: Bayesian Information Criterion, Cross Likelihood Ratio, косинусную дистанцию, KL-дивергенцию. Основным требованием, предъявляемым к выбранной метрике, является ее робастность. Основными источниками нестабильности метрики являются

внутридикторская вариативность, каналные искажения, а также различное количество данных, используемых для построения голосовой модели диктора.

Для сравнения моделей было решено применить метод LDA, который хорошо зарекомендовал себя в задаче текстонезависимого распознавания по голосу в совокупности с методом опорных векторов (Support Vectors Machine, SVM) для нормализации полученной оценки. При этом в качестве меры расстояния и ядра SVM используется косинусная дистанция.

Выбранный подход обеспечивает быстрое сравнение моделей, а также стабильный порог принятия решения.

## Описание системы

### Параметры обучения системы

UBM и T-матрица системы были обучены на фонограммах, полученных из следующих речевых баз данных: NIST SRE 1998, NIST SRE 1999, NIST SRE 2002, NIST SRE 2003, NIST SRE 2004, NIST SRE 2005, NIST SRE 2006, RUSTEN [7].

Было использовано 512 гауссоид для UBM, а размерность T-матрицы составила 400. При построении матрицы LDA размерность была редуцирована до 200.

Акустические признаки состояли из 13 мел-кепстральных коэффициентов (MFCC) со своими первыми и вторыми производными, а также нормализованными средними значениями. Набор импостеров для построения SVM-гиперплоскости состоит из 1300 гендеро-сбалансированных моделей дикторов, выбранных из базы обучения.

### Алгоритм разделения дикторов

Разработанный алгоритм разделения дикторов на фонограмме состоит из следующих этапов:

1. Построение MFCC по всей фонограмме.
2. Выделение речевых сегментов фонограммы путем анализа энергии сигнала.
3. Построение голосовых моделей дикторов на речевых сегментах фонограммы в соответствии с формулой (1).
4. Парное сравнение построенных моделей для получения матрицы «схожести».
5. Определение точек смены дикторов на фонограмме путем анализа полученной матрицы.
6. Агломеративная кластеризация речевых сегментов в соответствии с принадлежностью одному диктору.
7. Витерби-пересегментация речевых сегментов дикторов для уточнения их временных границ.
8. Повторная кластеризация голосовых моделей дикторов с уточненными границами речевых сегментов.

### Построение моделей и попарное сравнение

Использован детектор речевой активности (Voice Activity Detector, VAD), работающий на основе анализа энергии сигнала как для обучения, так и для тестирования системы. Акустические признаки вычислялись в соответствии с параметрами, указанными выше. Признаки, лежащие вне речевых сегментов фонограммы, исключались из дальнейшего рассмотрения.

Голосовые модели дикторов строятся для каждого временного окна длиной 1 с. со сдвигом 0,5 с. Проводя попарные сравнения построенных моделей, формируем их матрицу «схожести». Пример такой матрицы для фонограммы, содержащей речь двух дикторов, представлен на рис. 1. Светлые области рисунка соответствуют областям сравнения между голосовыми моделями, принадлежащими различным дикторам. Таким образом, для данного примера очевидно присутствие ровно двух дикторов на фонограмме. Начало и конец фонограммы принадлежат первому диктору, в то время как середина – второму.

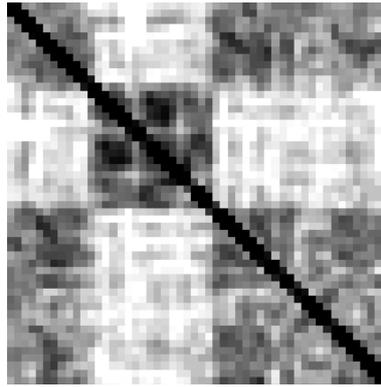


Рис. 1. Матрица «схожести» моделей фонограммы, содержащей запись двух дикторов

### Определение точек смены дикторов и кластеризация

Локальные минимумы результатов сравнений между моделями, следующими непосредственно друг за другом (поддиагональные элементы матрицы «схожести»), не превышающие определенный заранее порог  $\lambda_{CPD}$ , определяют точки смены дикторов.

Голосовые модели дикторов, находящиеся между двумя последовательными точками смены, объединяются в одну модель путем усреднения  $w$ -векторов и перестроения SVM-гиперплоскости для LDA-проекции усредненного значения. Объединенные таким образом модели образуют начальную кластеризацию речевых сегментов.

Далее выполняется последовательная агломеративная кластеризация моделей. Она включает в себя попарное сравнение всех голосовых моделей дикторов и объединение тех пар, сравнение между которыми соответствует наименьшему значению, не превышающему заранее определенного порога  $\lambda_{AC1}$ . Эта процедура выполняется до тех пор, пока есть возможность производить объединения.

Сегментация фонограммы по дикторам, полученная путем кластеризации, используется для построения GMM дикторов и применения алгоритма Витерби-пересегментации. Эта процедура производится с целью уточнения временных границ речевых сегментов дикторов. После чего применяется повторная агломеративная кластеризация с новым пороговым значением  $\lambda_{AC2}$ .

### Результаты численных экспериментов

Для тестирования разработанной системы разделения дикторов сформировано несколько тестовых баз, соответствующих различным сценариям. Они включают в себя присутствие на фонограмме: записей автоответчика (ANSWER-MACHINE); факта передачи трубки (CHANGE-SPEAKER); суммированного канала телефонных диалогов, полученных из тестового множества базы NIST SRE 2008 [8] (NIST2008); суммированного канала телефонных переговоров, содержащих факт передачи трубки или автоответчик (SUMMED); микрофонных записей конференций и совещаний (AMI [9]). Кроме этого, использовались фонограммы, на которых присутствует запись лишь одного диктора (MONOLOG). Описание выбранных тестовых баз можно найти в Табл. 1.

Таким образом, составленные базы данных имеют различные каналы связи, различные значения ОСШ (отношение сигнал/шум), различное число дикторов на фонограммах, содержат записи дикторов обоих полов, а также разговаривающих на различных языках (английский и китайский для баз NIST2008 и AMI, русский для всех остальных). Следовательно, они подходят для оценки эффективности разработанной системы.

Основной метрикой, определяющей качество системы разделения дикторов, является относительная длина ошибки сегментации (Diarization Error Rate, DER), представленная NIST [10]. Мы использовали модуль подсчета DER, используемый в NIST RTE 2006 [11], с длиной допустимой погрешности эталонной разметки 0,25 с. Поскольку нас не интересует измерение

качества работы VAD, будет представлена только величина ошибки сегментации по дикторам (Speaker Error Rate), являющаяся составной частью DER.

Таблица 1

Описание тестовых баз

Название тестовой базы	Суммированный канал, да/нет	Тип канала, тел./микроф.	Число дикторов	Кол-во файлов	Средняя продолжительность записи, с
ANSWER-MACHINE	нет	телефон	2	50	350
CHANGE-SPEAKER	нет	телефон	2	17	150
NIST2008	да	телефон	2	100	300
SUMMED	да	телефон	3	100	400
AMI	да	микрофон	4	55	1800

Кроме этого, для сопоставления полученных результатов использовалась система, основанная на методе Information Bottleneck (IB) [12]. Для нее применялся тот же самый VAD, те же акустические признаки и алгоритм Витерби-пересегментации, что и для разработанной (SCD) системы. Таким образом, единственное отличие этих двух систем заключается в процедуре кластеризации. Результаты тестирования как разработанной системы (SCD), так и системы разделения дикторов на основе IB (IB), представлены в Табл. 2. Все результаты, представленные для каждой отдельной системы, были получены при использовании одних и тех же параметров, настроенных оптимальным образом на базе развития.

Таблица 2

Результаты тестирования систем разделения дикторов

Система	Speaker Error Rate, %					
	ANSWER-MACHINE	CHANGE-SPEAKER	NIST2008	SUMMED	AMI	MONOLOG
SCD	3,85	1,59	13,72	9,8	14,8	1,11
SCD + Витерби	3,75	1,46	8,52	7,5	6,48	1,28
SCD + Витерби + повторная кластеризация	3,74	1,64	5,96	4,76	10,16	0,82
IB + Витерби	4,67	2,85	15,05	5,34	7,83	10,83

### Заключение

Как видно из Табл. 2, предложенная система (SCD + Витерби + повторная кластеризация) показывает лучшие результаты на всех тестовых базах за исключением базы AMI. Этот факт может быть объяснен недостаточным количеством фонограмм с микрофонными записями в исходной базе обучения.

Низкое значение величины Speaker Error Rate для тестовой базы MONOLOG свидетельствует о том, что разработанная система разделения голосов дикторов способна корректно определять истинное их число на фонограмме даже в случае, если оно равно единице. Это замечание является важной характеристикой системы, поскольку значительная часть телефонных переговоров не включает в себя случаи присутствия автоответчика или факта передачи трубки. Таким образом, эта реализация может быть применена для детектирования наличия факта передачи трубки, а также выделения автоответчика на фонограмме.

К основным результатам проекта можно отнести:

1. Разработку системы разделения дикторов на фонограмме, способной работать при условии, когда число дикторов заранее не известно.

2. Формирование обучающей базы.
3. Формирование представительной тестовой базы, позволяющей оценить эффективность разработанной системы.
4. Реализацию разработанной системы в программном коде языка программирования C++ с использованием математических библиотек.

### Области возможного использования результатов проекта

Результаты работы найдут дальнейшее применение в коммерческих продуктах компании «ООО Центр речевых технологий», которые включают в себя системы автоматического распознавания дикторов по голосу, системы автоматического распознавания речи.

Результаты исследований будут применены на кафедре речевых информационных систем НИУ ИТМО в учебном процессе при проведении практических занятий и лабораторных работ по курсу «Распознавание дикторов», а также в научно-исследовательской работе.

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

### Публикации

1. Кудашев О.Ю., Пеховский Т.С. Проблемы инициализации систем сегментации дикторов на основе вариационного байесовского анализа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3 (79). С. 84–87.
2. Кудашев О.Ю., Пеховский Т.С. Разработка системы сегментации дикторов на основе вариационного байесовского анализа // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. Труды молодых ученых. СПб., 2012. С. 35–36.
3. Кудашев О.Ю. Агломеративная кластеризация речевых сегментов фонограммы на основе байесовского информационного критерия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1 (83). С. 90–93.
4. Козлов А.В., Кудашев О.Ю., Матвеев Ю.Н., Пеховский Т.С., Симончик К.К., Шулина А.К. Система идентификации дикторов по голосу для конкурса NIST SRE 2012 // Труды СПИИ РАН. 2013. № 2. С. 350–370.
5. Кудашев О.Ю. Система разделения дикторов в полилоге // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2013. С. 29–30.
6. Kudashev O., Kozlov A. The diarization system for an unknown number of speakers // Speech and Computer. Lecture Notes in Computer Science (Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference; September 1–5, 2013, Pilsen, Czech Republic). 2013. Vol. 8113. P. 340–344.

### Литература

1. Бельх И.Н., Капустин А.И., Козлов А.В. и др. Система идентификации дикторов по голосу для конкурса NIST SRE 2010 // Информатика и ее применения. 2012. Т. 6. Вып. 1. С. 91–98.
2. Dehak N., Kenny P.J., Dehak R. et al. Front-end factor analysis for speaker verification // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2011. Vol. 19. No 4. P. 788–798.
3. Jin Q., Laskowski K., Schultz T., Waibel A. Speaker segmentation and clustering in meetings // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP – 2004, Jeju Island, South Korea, October 2004): <http://www.cs.cmu.edu/~kornel/pubs/P04a.pdf>.
4. Reynolds D., Kenny P., Castaldo F. A study of new approaches to speaker diarization // Proc. Interspeech (6–10 September 2009, Brighton, UK). P. 1047–1050.
5. Tranter S., Reynolds D. An overview of automatic speaker diarisation systems // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2006. Vol. 14. No 5. P. 1557–1565.
6. Kenny P. Bayesian analysis of speaker diarization with eigenvoice priors // Technical report. Centre de recherche informatique de Montreal (CRIM) (Montreal, Canada, 2008): <http://www.crim.ca/perso/patrick.kenny/BayesCluster.pdf>.
7. Linguistic Data Consortium: <http://www ldc.upenn.edu>.
8. 2008 NIST Speaker Recognition Evaluation Test Set: <http://www ldc.upenn.edu/Catalog/catalogEntry.jsp?catalogId=LDC2011S08>.

9. AMI Meeting Corpus: <http://corpus.amiproject.org>.
10. Rich Transcription Evaluation Project: <http://www.itl.nist.gov/iad/mig/tests/rt>.
11. Rich Transcription Spring 2006 Evaluation: <http://www.itl.nist.gov/iad/mig/tests/rt/2006-spring>.
12. Vijayasenan D., Valente F., Bourlard H. An information theoretic approach to speaker diarization of meeting data // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. 2009. Vol. 17. No 7. P. 1382–1393.



**Кузнецова Людмила Михайловна**  
**Факультет пищевых технологий (ИХиБТ)**  
**Кафедра технологии молока и пищевой биотехнологии**  
**E-mail: mamaeva.ludmila@mail.ru**

## **МЕТОДЫ БИОТЕХНОЛОГИИ В СОЗДАНИИ НОВЫХ ФОРМ БЕЛКОВОЙ ПИЩИ ИЗ ЛЮПИНА**

Л.М. Кузнецова

Научный руководитель – профессор Л.А. Забодалова

### **Введение**

Ограничение ресурсов питания, вызванное как экологическими, так и демографическими факторами, вынуждает ученых и практиков искать способы удовлетворения потребности в жизненно важных пищевых нутриентах. В этой связи целесообразно внедрять наукоемкие технологии в области получения пищевых белков, извлеченных из натурального сырья [1, 2].

Пищевой люпин поздней селекции имеет высокое содержание белков и характеризуется низким содержанием алкалоидов. В исследованиях Н.А. Юрченко, И.А. Махотиной, Ж.И. Богатыревой, А.И. Артюхова, В.Ф. Короля и др. подтверждена безопасность и высокая пищевая ценность этого сырья.

Для улучшения биоконверсии структурных и запасных полисахаридов люпиновой муки при получении белкового концентрата, а также в целях снижения антипитательных свойств сырья на стадии экстрагирования небелковых соединений, было решено провести ферментативный гидролиз углеводного комплекса люпиновой муки в кислой среде отдельными ферментами или их композицией. Данный подход позволяет получить белковую пасту с высоким содержанием белка и люпиновую белковую основу, которая в дальнейшем, совместно с молочным сырьем или индивидуально, ферментируется молочнокислыми бактериями в целях создания комбинированного кисломолочного продукта или аналога кисломолочного продукта.

Целью работы является разработка технологии получения концентрата белков люпина методом направленной энзиматической деструкции полисахаридов исходного сырья, а также технологии и рецептур продуктов сложного сырьевого состава на его основе. При проведении научно-исследовательской работы необходимо решить следующие задачи:

- получить препарат белков с высокими функционально-технологическими свойствами;
- получить аналог кисломолочного продукта с повышенным содержанием белка функционального назначения для питания людей с лактазной недостаточностью;
- получить пищевой продукт сложного сырьевого состава с высокой бактерицидной активностью (пробиотической);
- сократить время, необходимое на производственный цикл ферментации;
- повысить пищевую и биологическую ценность продуктов.

### Методология проведения эксперимента

Для проведения экспериментов была использована люпиновая мука из семян люпина узколистного сорта «Снежень», предоставленная ВНИИ люпина г. Брянск, с содержанием сырого протеина 46 % на с. в. (в пересчете на сухое вещество), сырого жира – 7,1 % на с. в., клетчатки – 4,5 % на с. в. Работа велась на кафедре технологии молока и пищевой биотехнологии Института холода и биотехнологий НИУ ИТМО и в ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт жиров РАСХН».

Влажность продуктов определяли весовым методом в соответствии с ГОСТ 13586.5-93 и ГОСТ 29144-91; содержание сырого протеина – по методу Кьельдаля на автоматическом анализаторе Kjeltec Auto 1030 фирмы Tecator (Швеция) в соответствии с ГОСТ 13496.4-93. Содержание сырого жира в белковой пасте – по ГОСТ 13496.15-97; сырого протеина в люпиновой сыворотке по ГОСТ 25179-90; титруемую кислотность люпиновой сыворотки определяли по ГОСТ 3624-92; плотности люпиновой сыворотки по ГОСТ 3625-84; содержание сухих веществ в сыворотке в соответствии с ГОСТ 3626-73. Определение массовой доли общего сахара (в расчете на инвертный) в люпиновой сыворотке выполняли по методу Бертрана по ГОСТ 3628-78. Анализ компонентного состава моно- и дисахаридов в сыворотке проводился методом ВЭЖХ по ГОСТ Р 53766-2009.

Компонентный анализ супернатанта проводился на жидкостном хроматографе фирмы «Стайер» с рефрактометрическим детектором, на колонке, заполненной сорбентом «Luna NH2 5μ» фирмы «Phenomenex». В качестве подвижной фазы использовалась смесь ацетонитрил-вода, взятая в объемных соотношениях 77:23. Состав органических кислот в сыворотке, полученной центрифугированием образцов, определяли с помощью жидкостного хроматографа «Стайер» (ООО «Аквилон») со спектрофотометрическим детектором на колонке «Luna C18» фирмы «Phenomenex», USA по ГОСТ 54684-2011. В качестве элюента использовали 0,1 % ортофосфорную кислоту.

### Технология получения белковых концентратов из растительного сырья

При разработке технологии получения концентрата белков люпина за основу была принята технологическая схема переработки соевого шрота [3, 4], в которую были внесены изменения в соответствии с предлагаемым способом обработки исходной муки (Табл. 1).

Таблица 1

Технологическая схема процесса получения люпинового белкового концентрата

Технологический процесс	Параметры и показатели
<b>Приемка</b>	
Люпиновая мука	В соответствии с ТУ 9196-006-11951678-2001
Вода питьевая	В соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01
Ферментный препарат целлюлазы	В соответствии с ТУОП 64-13-162-90
Ферментный препарат ксиланазы	В соответствии с ТУ 9291-019-77388084-2005
<b>Получение растительной основы</b>	
Составление гидромодуля	Соотношение мука:вода 1:15 Температура воды (55±2) °С рН = 4,4–4,5; продолжительность 40 мин.; скорость вращения мешалки 500 об/мин
Экстрагирование небелковых соединений в присутствии целлюлазы или мультиэнзимной композиции (МЭК)	
Резервуар с рубашкой и мешалкой, насос	
Центрифугирование	3500 об/мин, 15 мин.
Промывка белковой пасты	соотношение паста:промывная вода 1:6; рН = 4,5
Емкость с мешалкой, насос	
Отделение промывной воды	Получение суспензии с концентрацией сухих веществ 10 %
Сепаратор, насос	

Технологический процесс	Параметры и показатели
Нейтрализация	рН = 6,8-6,9
Емкость с мешалкой, насос	
Диспергирование	t=60–65 °С; 10 мин. при 24000 об/мин
Распылительная сушка получение препарата белков с остаточной влажностью 4-5 % t сушильного агента на входе = 175–180 °С; t сушильного агента на выходе = 70–80 °С	

Деградиацию некрахмалистых полисахаридов наиболее эффективно можно провести в присутствии комплексных цитолитических систем, в состав которых входят целлюлазы эндо- и экзо-типов и эндоглюканызы (Целлюлаза-100, Целловиридин, Целлюкласт) [5, 6]. Разрушению лигноуглеводных комплексов и гемицеллюлоз совместно с целлюлазами способствует препарат ксиланазы (Пентопан Моно) [7]. Для гидролиза крахмала подобраны амилолитические ферменты, активные в области средних ( $\alpha$ -амилаза) и высоких (Дистицим БА-Т Специал) температур. В Табл. 2 представлены ферментативные активности препаратов, которые использовались в данной работе.

Таблица 2

Активности используемых ферментных препаратов (ФП)

Наименование препарата	Ферментативная активность
Celluclast BG (препарат стандартизирован по целлюлазе); АО «Novozymes A/S» (Дания)	Целлюлазная: 3500 ед/г;
Целлюлаза-100 (препарат стандартизирован по целлюлазе)	Целлюлазная: 540 ед КМЦ*/мл; присутствуют ксиланазная и $\beta$ -глюканызная активности;
Целловиридин Г20х (препарат стандартизирован по целлюлазе)	Целлюлазная: 200 ед КМЦ*/мл; присутствуют ксиланазная и $\beta$ -глюканызная активности;
Пентопан Моно (препарат стандартизирован по ксиланазе) АО «Novozymes A/S» (Дания)	Ксиланазная: 2500 ед/мл
$\alpha$ -амилаза ( $\alpha$ -1,4-глюкан-4-глюканогидролаза)	Амилолитическая: 750 ед/г;
Дистицим БА-Т Специал (препарат стандартизирован по $\alpha$ -амилазе)	Амилолитическая: 950 ед/г

\* – карбоксиметилцеллюлоза

### Исследование действия ферментных препаратов различной субстратной специфичности на экстрагируемость небелковых соединений из муки люпина

Эффективность биоконверсии углеводсодержащих компонентов и антипитательных факторов, входящих в состав муки люпина, оценивалась по содержанию сырого протеина в полученном жировом концентрате, а также по увеличению его количества по сравнению с данными контрольной пробы (без введения ФП) и с данными по исходному сырью.

В Табл. 3 приведены физико-химические показатели продуктов, полученных при совместном проведении кислотного экстрагирования небелковых соединений и ферментативного гидролиза суспензии с помощью ферментов. Эксперимент проводился при 50 °С, рН 4,4÷4,5 и гидромодуле 1:10.

Количественное определение содержания сырого протеина в сыворотке позволяет сделать вывод о том, что в соответствии с материальным балансом процесса потери белка в среднем составляют 19 %. Методом Сокслета определено содержание липидов в белковой пасте, содержание жира в конечном продукте увеличилось на 3-4 % по сравнению с исходной мукой. Использование целлюлаз и ксиланаз при экстрагировании небелковых соединений в исследуемых условиях приводит к наилучшим результатам. Для повышения эффективности использования ферментов необходимо подобрать оптимальные условия ведения процесса.

Таблица 3

Физико-химические показатели продуктов экстракции небелковых соединений из муки люпина с различными ФП

Наименование ФП	Дозировка ФП, ед/г	Содержание сырого протеина в пасте, % на с. в.	Влажность пасты, %	Сухие вещества сыворотки, %	Содержание сырого протеина в сыворотке, % на с. в.
Контроль	-	50,40±1,30	75,22±1,06	1,30±0,36	28,02±1,02
Целлюлаза-100	1,08	53,28±1,10	77,87±0,53	2,00±0,80	34,00±1,50
Целлюкласт		49,95±1,09	79,21±0,55	1,91±0,35	30,39±1,02
Целловиридин		48,80±1,90	74,20±0,60	1,83±0,25	32,00±1,01
Дистицим БА-Т Специал	0,7	51,9±1,3	76,53±1,06	1,42±0,33	31,00±1,30
α-Амилаза		48,2±1,1	71,60±0,35	0,99±0,36	29,40±1,18
Пентопан Моно	5	53,02±1,20	78,55±0,88	1,73±0,32	34,09±1,42
	25	52,25±1,09	76,50±1,30	1,75±0,5	34,08±1,81

### Оптимизация условий ведения процесса экстрагирования небелковых соединений с ферментным препаратом целлюлазы

На содержание сырого протеина в продукте ( $y$  – массовая доля сырого протеина, % на с. в.) изучалось влияние трех факторов: температуры ( $z_1$ ) в диапазоне 50–60 °С; дозировки ФП Целлюлаза-100 ( $z_2$ ) в диапазоне 0,54–1,62 ед./г; соотношения вода:мука ( $z_3$ ) в количестве 10:1; 15:1; 20:1. Экспозиция суспензии с ФП проводилась в течение 40 мин.

Для ротатабельного униформ-плана при  $k = 3$  значение звездного плеча  $\alpha$  (расстояния от центра плана до звездной точки) составляет 1,682; радиус сферы, на котором находятся точки ядра плана  $\rho_{я} = 1,73$ ; число опытов в центре плана  $n_0 = 6$  [8]. После отсева незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 58,52 - 4,59x_1^2 - 3,06x_2^2 - 1,73x_3^2.$$

Адекватность уравнения оценивалась по критерию Фишера  $F = 2,08$ , при  $F_{табл} = 4,68$ .

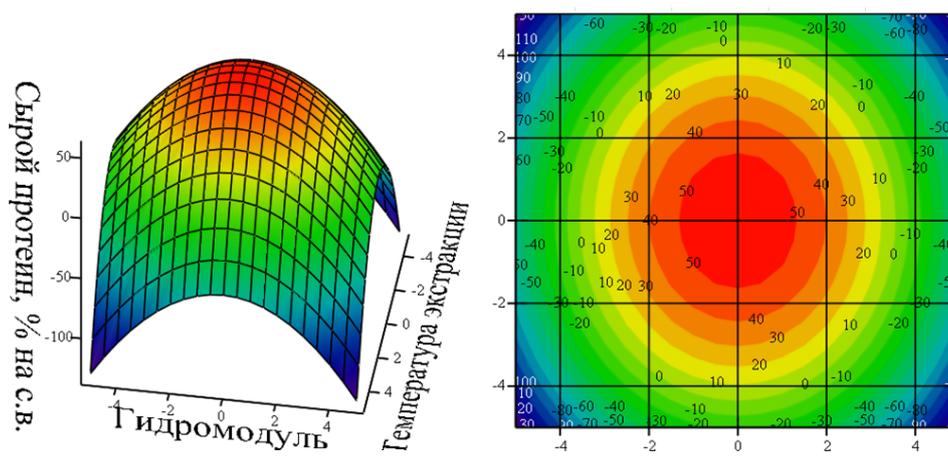


Рис. 1. Поверхность отклика зависимости содержания сырого протеина в пасте от температуры экстрагирования и гидро модуля, а также изолинии ее сечений

Полученные поверхности отклика зависимости содержания сырого протеина в пасте от исследуемых факторов имеют вид эллиптического параболоида (рис. 1). Координаты оптимума (максимум) лежат в центре плана.

В ходе исследования установлены оптимальные параметры совмещенного процесса экстрагирования небелковых соединений в изоэлектрической точке и ферментативного

расщепления балластных веществ люпиновой муки целлюлолитическим ферментом: температура 55 °С, гидромодуль 1:15, дозировка фермента 1,08 ед/г.

При проведении процесса в оптимальных условиях содержание сырого протеина в целевом продукте составило ( $59,3 \pm 1,1$ ) % на с. в. и в среднем возросло на 12-13 % по сравнению с исходной мукой и на 8-9 % по сравнению с контрольным продуктом.

#### Составление мультиэнзимных композиций

Для проведения эффективного гидролиза были составлены мультиэнзимные композиции (МЭК) из перечисленных препаратов (Табл. 4).

Таблица 4

Физико-химические показатели белковой пасты и сыворотки при использовании композиций ферментных препаратов

№	Композиция	Содержание сырого протеина в пасте, % на с.в.	Влажность белковой пасты, %	Сухие вещества сыворотки, %
1	1,08±0,02 ед/г ФП «Целлюлаза-100» и 0,7 ед/г «Дистицим БА-Т Специал»	54,90±1,40	76,19±1,03	1,72±0,06
2	1,08±0,02 ед/г ФП «Celluclast BG» и 5±1 ед/г «Pentopan Mono BG»	56,04±1,10	80,56±0,44	1,78±0,33
3	1,08±0,02 ед/г ФП «Celluclast BG» и 25±1 ед/г «Pentopan Mono BG»	51,88±1,30	74,69±0,46	1,88±0,06

Соотношение препаратов в мультиэнзимных композициях рассчитывалось исходя из заявленной активности. При проведении экстракции небелковых соединений из муки люпина МЭК № 2 содержание сырого протеина в целевом продукте возрастает примерно на 10 % по сравнению с исходной мукой и на 6 % по сравнению с контрольным продуктом.

#### Исследование углеводного состава люпиновой сыворотки

Химический состав исходной муки с содержанием сухих веществ 90 % и сыворотки с содержанием сухих веществ 2 %, полученной в результате ферментативной обработки субстрата МЭК № 2, представлен в Табл. 5.

Таблица 5

Химический состав исходной муки и полученной люпиновой сыворотки

Наименование показателя	Значение показателя, %	Значение показателя, % на с. в.
<b>Исходная мука:</b>		
Общий азот	6,62	7,36
Сырой жир	6,39	7,00
Сырая клетчатка	4,00	4,50
БЭВ, в том числе:	37,40	41,50
Моно- и дисахариды	3,10	3,40
<b>Сыворотка:</b>		
Общий азот	0,096	4,8
Сырой жир	0,89	44,5
Сырая зола	0,01	0,5
БЭВ, в том числе:	0,5	25
Сахароза	0,34	17
Моносахариды	0,06	3

Уравнение материального баланса:  $M_{\text{муки}}CB_{\text{муки}}U_{\text{муки}} = M_{\text{сыв}}CB_{\text{сыв}}U_{\text{сыв}}$ ,  
 где  $M$  – масса продукта, г;  $CB$  – массовая доля сухих веществ, д. ед.;  $U$  – массовая доля углеводов, д. ед. Подставив численные значения, получим:  $100 \cdot 0,92 \cdot 0,034 \rightarrow 1280 \cdot 0,02 \cdot 0,25$ ;  $3,12 \rightarrow 6,4$ .

Согласно приведенному уравнению суммарное количество моно- и дисахаридов в супернатанте увеличилось в 2 раза по сравнению с суммарным количеством растворимых углеводов исходного субстрата – цельносмолотой люпиновой муки, что свидетельствует об эффективности разрушения полисахаридов в процессе ферментативной обработки.

### Разработка технологии получения обогащенного кисломолочного продукта с добавлением концентрата белков люпина

По методикам ВНИИЖ были определены функционально-технологические свойства концентрата белков люпина, полученного в результате гидролитической обработки люпиновой муки МЭК № 2 (Табл. 6).

Таблица 6

Функционально-технологические свойства белкового препарата люпина и люпиновой муки

Образец	ВУС, %	ЖУС, %
Мука люпина	210±15	97±5
Концентрат белков люпина	317±15	409±5

Экстракция небелковых соединений в присутствии ФП позволяет повысить функционально-технологические свойства готового продукта. Влагоудерживающая способность (ВУС) возрастает в 1,5 раза, а жирудерживающая (ЖУС) – в 4,2 раза по сравнению с исходной мукой.

Кисломолочные продукты были получены с добавлением 0,3 %, 1 % и 2 % белкового препарата. С целью выявления оптимальной дозы внесения добавки были изучены органолептические, структурно-механические показатели и пищевая ценность целевого продукта.

Сухое обезжиренное молоко (СОМ), восстановленное до массовой доли белка 3 % в соответствии с ТТИ ГОСТ Р 52090-2003 и цельное молоко, произведенное по ГОСТ Р 52054-2003 с массовой долей белка  $2,8 \pm 0,2$  % и жира  $3,6 \pm 0,1$  %, пастеризовали при  $(92 \pm 2)$  °С с выдержкой 5 мин. Затем вносили белковый препарат и сквашивали йогуртной закваской.

Полученные сгустки были плотными и имели выраженный кисломолочный вкус и запах. При внесении препарата в количестве более 1 % наблюдается легкий бобовый привкус, продукт приобретает кремовый оттенок. С помощью расчетных коэффициентов ( $P_{\eta}$  – коэффициент потерь вязкости, КМС – коэффициент механической стабильности,  $B_{\eta}$  – относительная степень восстанавливаемости структуры) проведена сравнительная характеристика структурно-механических свойств кисломолочных продуктов, полученных на цельном и обезжиренном молоке (Табл. 7).

Таблица 7

Структурно-механические показатели кисломолочных продуктов с различным содержанием препарата белков люпина в своем составе

Массовая доля препарата, %	Показатели			
	$P_{\eta}$ , %	КМС	$B_{\eta}$ , %	Относительная степень разрушения структуры
Сгустки на восстановленном обезжиренном молоке				
-	54,9±1,4	2,20±0,15	70,1±3,1	0,306
0,3	28,5±1,3	1,40±0,11	85,7±3,2	0,195
1,0	54,9±1,1	2,20±0,10	60,0±3,6	0,306
2,0	61,5±2,3	2,60±0,14	57,7±3,1	0,362

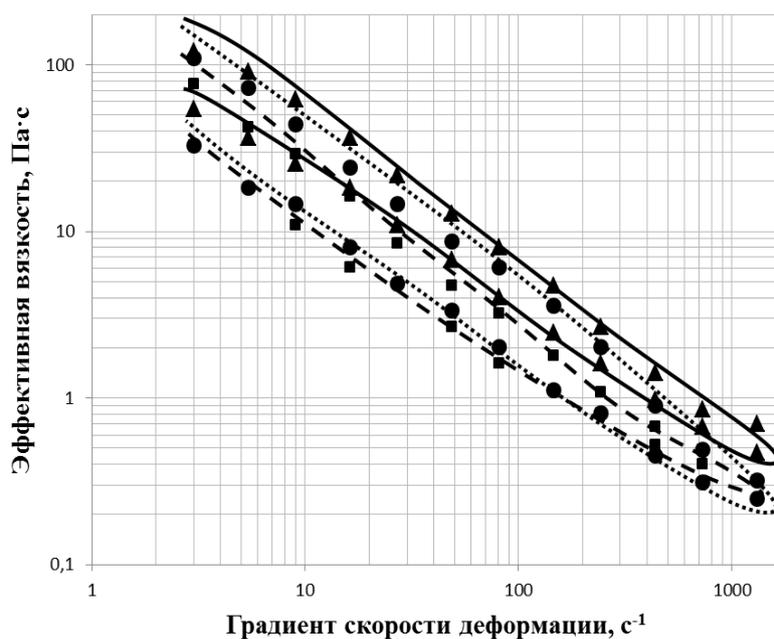
Массовая доля препарата, %	Показатели			
	$P_{\eta}$ , %	КМС	$B_{\eta}$ , %	Относительная степень разрушения структуры
Сгустки на цельном молоке				
-	19,9±1,3	1,30±0,14	86,6±3,3	0,173
1,0	23,1±1,1	1,30±0,10	84,0±3,1	0,179
2,0	28,5±2,1	1,40±0,12	78,1±3,1	0,192

На основании проведенной серии экспериментов можно утверждать, что оптимальным является использование белкового препарата из семян люпина в количестве до 1 %. Применение его в качестве белкового обогатителя полножирного молочного сырья позволяет добиться меньшей степени разрушения структуры продукта и большей степени восстанавливаемости структуры, чем в качестве обогатителя обезжиренного молочного сырья.

### Разработка рецептуры и технологии высокобелковых ферментированных продуктов сложного сырьевого состава на растительной и молочно-растительной основе

Отличие предложенного способа получения аналога кисломолочного продукта от известных состоит в том, что в качестве исходного сырья используют люпиновую белковую основу с массовой долей сухих веществ 8–10 %, белка 5–6 %, жира 0,8–1 %. Скваживание (ферментацию) дисперсии осуществляют 8 ч йогуртовой закваской. Для получения комбинированного продукта в нейтрализованную суспензию белково-липидного концентрата с рассчитанным содержанием сухих веществ вносят сухое обезжиренное молоко по рецептуре с целью получения образцов с различным соотношением молочного и растительного белка в смеси (50:50, 25:75, 75:25). Суспензию гомогенизируют и диспергируют при  $t=60-65$  °С, пастеризуют при температуре 92 °С в течение 3–5 мин., охлаждают до температуры ферментации  $t = (42 \pm 2)$  °С и вносят закваску (*Streptococcus salivarius* sp. *thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*) в количестве 3–5 %. Ферментацию проводят при температуре  $t = (42 \pm 2)$  °С до pH 4,4–4,5.

Внесение сухого обезжиренного молока в количестве до 3,5 % от массы заквашиваемой смеси (образец сухое обезжиренное молоко/концентрат белков люпина (СОМ/КБЛ) 75:25) меняет характер кривой кислотонакопления. Наличие в суспензии растительного белка значительно ускоряет процесс, что позволяет сократить время на производственный цикл ферментации.



▲ Аналог кисломолочного продукта, ■ Контроль, ● 50/50

Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости сгустка от градиента скорости деформации

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента эффективной вязкости от градиента скорости деформации для аналога кисломолочного продукта, кисломолочного продукта на обезжиренном молоке (контроль) и комбинированного продукта с соотношением СОМ/КБЛ 50/50. С повышением напряжения сдвига наблюдается понижение вязкости, что говорит о неньютоновском (псевдопластическом) характере течения вещества.

Для аналога кисломолочного продукта уравнение зависимости коэффициента эффективной вязкости от скорости сдвига в Па на прямом ходу:  $\eta_{эф} = 412,46\gamma^{-0,909}$   $R^2 = 0,9952$ ; на обратном ходу:  $\eta_{эф} = 149,26\gamma^{-0,815}$   $R^2 = 0,9975$ .

Площади полученных петель гистерезиса соизмеримы, при этом вязкость аналога йогурта выше, чем контрольного продукта.

Физико-химические свойства полученных продуктов и их биологическая ценность представлены в Табл. 8.

Таблица 8

Содержание основных пищевых веществ в готовом продукте, г/100 г продукта

Показатель	Содержание		
	Аналог кисломолочного продукта	Комбинированный продукт	Базовый йогурт
Белки	4,8±0,2	4,8±0,2	5,0
Жиры	0,8±0,1	0,6±0,2	1,5
Углеводы	7,9	10,3	10,4
Сахароза	5,5	5,7	6,5
Клетчатка	0,4±0,1	0,2±0,1	-
Содержание молочной кислоты, г/дм <sup>3</sup>	0,93±0,19	6,70±1,34	6,89±1,16
Содержание яблочной кислоты, г/дм <sup>3</sup>	0,17±0,03	1,85±0,37	-
Активная кислотность, рН	3,8-4,5		

Биологическая ценность белковой составляющей продуктов

Аминокислота	Аминокислотный скор, %		
	Аналог кисломолочного продукта	Комбинированный продукт	Базовый продукт
Валин	81	92	129
Изолейцин	96	119	150
Лейцин	95	122	128
Лизин	94	104	141
Метионин + цистин	65 min а/к скор	83 min а/к скор	94 min а/к скор
Фенилаланин + тирозин	119	153	156
Триптофан	75	96	144
Треонин	88	106	108
Коэффициент рациональности аминокислотного состава	0,7	0,73	0,7
Показатель сопоставимой избыточности	0,15	0,13	0,15
Коэффициент различий аминокислотного сора (КРАС)	25,7	26,30	37,25
Биологическая ценность (БЦ), % (БЦ =100-КРАС)	75,9	73,70	62,75

Полученные продукты содержат все необходимые для организма человека питательные вещества и характеризуются повышенной пищевой и энергетической ценностью, дополняют рацион растительными белками, жирами, углеводами и клетчаткой, необходимой для правильного функционирования желудочно-кишечного тракта.

#### **Научная новизна:**

- теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования цельносмолотой муки из семян люпина узколистного сорта «Снежень» для получения белкового концентрата с высокой пищевой и биологической ценностью;
- научно обосновано предположение о том, что энзиматическая деструкция полисахаридов люпиновой муки приводит к изменению их растворимости и повышению концентрации сырого протеина в белковой пасте за счет более полной экстракции небелковых соединений при рН изоэлектрической точки белков;
- теоретически и экспериментально обоснованы параметры процесса, определена оптимальная дозировка целлюлаз, необходимая для достижения максимального содержания белка в целевом продукте;
- проведены исследования действия амилаз и ксиланаз на экстрагируемость небелковых соединений из муки люпина. Составлены мультиэнзимные композиции из предлагаемых ФП с целью проведения многосубстратной биоконверсии муки;
- исследован компонентный состав супернатанта. Установлено, что количество растворимых углеводов в супернатанте возросло в 2 раза по сравнению с исходной мукой;
- изучены функционально-технологические свойства белкового препарата и подтверждена возможность его использования в качестве пищевой добавки;
- исследованы органолептические, синергетические и реологические свойства ферментированного продукта на растительной основе;
- предложено соотношение молочного и растительного белка в смеси, позволяющее получить комбинированный продукт с оптимальными синергетическими свойствами, наилучшими органолептическими и реологическими характеристиками, с повышенной пищевой и биологической ценностью.

#### **Практическая значимость**

Предложена технология получения концентрата белков люпина методом направленной энзиматической деструкции полисахаридов. Разработаны рецептуры и технологии получения аналога кисломолочного продукта и пищевого продукта сложного сырьевого состава на молочно-растительной основе с пробиотическими свойствами, составлены проекты технической документации. Зарегистрирована заявка на изобретение РФ № 2014104656 «Способ получения кисломолочного продукта на растительной основе».

Данный проект поддержан грантом Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» в номинации «Медицина будущего. Биотехнологии» в 2013 г.

#### **Заключение**

Разработана технология получения белкового концентрата люпина с использованием процесса экстракции небелковых соединений из люпиновой муки в кислой среде, совмещенного с обработкой углеводов субстрата комплексом гидролитических ферментов. Проведена оптимизация условий ведения процесса, получено уравнение регрессии зависимости содержания сырого протеина в продукте от температуры; соотношения вода:мука и дозировки ФП Целлюлаза-100. Установлены оптимальные параметры процесса: температура 55 °С, гидромодуль 1:15, дозировка целлюлолитического фермента 1,08 ед/г.

Из имеющихся ФП были составлены мультиэнзимные композиции (МЭК); целевой продукт, полученный с наиболее эффективной из них имеет содержание сырого протеина на 10 % большее по сравнению с исходной мукой и на 6 % по сравнению с контрольным продуктом.

Подтверждена эффективность разрушения полисахаридов в процессе ферментативной обработки. Суммарное количество моно- и дисахаридов в супернатанте по данным материального баланса процесса увеличилось в 2 раза по сравнению с суммарным количеством растворимых углеводов исходного субстрата.

Изучены функционально-технологические свойства концентрата белков люпина и установлено, что влагоудерживающая способность препарата возросла в 1,5 раза, а эмульгирующая способность в 4,2 раза по сравнению с исходной мукой. Подтверждена возможность использования препарата в качестве пищевой добавки в оптимальном количестве до 1 %.

Разработаны рецептуры и технологии получения аналога кисломолочного продукта и пищевого продукта сложного сырьевого состава на молочно-растительной основе с пробиотическими свойствами. Для исследуемых продуктов построены логарифмические кривые течения, получены уравнения вязкости их характерных участков.

Предложено соотношение молочного и растительного белка в смеси, позволяющее получить комбинированный продукт с оптимальными синергетическими свойствами, наилучшими органолептическими и реологическими характеристиками, с повышенной пищевой и биологической ценностью.

Составлен бизнес-план производства белкового препарата и ферментированных продуктов. Начало выпуска продукции планируется на последний квартал 2014 г., далее периодом планирования является финансовый год. Период жизни проекта составляет четыре года. Разработанные продукты на растительной и молочно-растительной основе могут быть использованы в питании детей, лиц пожилого возраста, беременных женщин, спортсменов, людей, страдающих лактазной недостаточностью и сахарным диабетом. В дальнейшем планируется рост прибыли за счет выпуска новой линейки продукции: белковых паст, комбинированных продуктов, десертов и др.

Проект предусматривает внедрение технологии на молокоперерабатывающее производство, оборудованное цехом распылительной сушки. Потребность в инвестициях составляет 7 млн руб. (с учетом дисконтирования денежных потоков по ставке 12 %).

Промышленный способ получения ферментированного продукта на растительной основе позволяет снизить себестоимость аналога йогурта в 1,7 раза при величине показателя рентабельности продукции 10 %. Себестоимость комбинированного продукта на молочно-растительной основе ниже в 1,3 раза по сравнению с базовым продуктом. Общая годовая экономия производства при получении ферментированных продуктов составляет 60 тыс. руб./т. Научные и производственные риски при реализации проекта могут быть связаны с необходимостью формирования у потенциального потребителя лояльности к предлагаемым продуктам из нетрадиционного сырья.

## Публикации

1. *Мамаева Л.М.* Люпин – перспективное сырье для получения белковых концентратов // Сб. трудов молодых ученых. Ч. III. СПб., 2010. С. 4–6.
2. *Доморощенкова М.Л., Демьяненко Т.Ф., Мамаева Л.М.* Исследование процесса получения белковых концентратов люпина с использованием ферментативного гидролиза полисахаридов // Мат-лы X Международной конференции «Масложировая индустрия – 2010» (27–28 октября 2010 г., Санкт-Петербург). СПб., 2010. С. 110–111.
3. *Забодолава Л.А., Доморощенкова М.Л., Демьяненко Т.Ф., Кузнецова Л.М.* Применение комплекса гидролитических ферментов при получении концентрата белков люпина // Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 1: <http://processes.open-mechanics.com>.
4. *Забодолава Л.А., Доморощенкова М.Л., Демьяненко Т.Ф., Кузнецова Л.М.* Исследование процесса получения концентрата белков люпина с использованием мультиэнзимных композиций // Сб. материалов Международной научно-практической конференции «Культура люпина – его возможности и перспективы», посвященной 25-летию со дня образования

- ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт люпина Россельхозакадемии (4–5 июля 2012 г., г. Брянск, Россия). Брянск, 2012. С. 266–271.
5. *Забодалова Л.А., Доморощенко М.Л., Демьяненко Т.Ф., Кузнецова Л.М.* Применение ферментативного гидролиза в технологии белковых концентратов из люпина // Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 2: <http://processes.open-mechanics.com>.
  6. *Забодалова Л.А., Доморощенко М.Л., Демьяненко Т.Ф., Кузнецова Л.М.* Исследование технологии получения концентрата белков люпина с использованием процесса энзиматической деструкции полисахаридов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 3. С. 33–36.
  7. *Кузнецова Л.М.* Получение концентрата белков люпина методами биотехнологии и создание инновационных продуктов сложного сырьевого состава на его основе // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 4. СПб., 2013. С. 68–70.
  8. *Кузнецова Л.М., Доморощенко М.Л., Демьяненко Т.Ф.* Ферментативная биоконверсия полисахаридов муки люпина и ее применение при получении белковых концентратов из растительного сырья // Научные работы участников конкурса «Молодые ученые НИУ ИТМО» 2012 года. СПб., 2013. С. 119–125.
  9. *Забодалова Л.А., Кузнецова Л.М., Киябаева А.А.* Применение белкового препарата люпина, полученного многосубстратной биоконверсией исходного сырья, в технологии ферментированных молочных продуктов // Известия вузов. Пищевая технология. 2013. № 2–3 (332–333). С. 64–66.
  10. *Kuznetsova L., Zabodalova L.* Creation of new forms of protein foods from lupin by biotechnological methods // Сб. тезисов докладов научно-практической конференции молодых ученых «Современные тенденции в развитии пищевой биотехнологии» (Санкт-Петербург, 4–6 июня 2013 г.) в рамках проекта TEMPUS DEFRUS. СПб., 2013. С. 39–43.
  11. *Забодалова Л.А., Кузнецова Л.М., Киябаева А.А.* Влияние белкового препарата из семян люпина узколистного на органолептические и структурно-механические показатели кисломолочных продуктов // Мат-лы VI Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (13–15 ноября 2013 г.). СПб., 2013. С. 557–560.
  12. *Kuznetsova L., Zabodalova L.* Study of high-protein products of a complex raw material composition technology on the lupin basis // Сб. статей китайско-русской конференции «Питание и специальные пищевые продукты в экстремальных условиях» (2013.9.20–22). С. 30–36.
  13. *Кузнецова Л.М., Доморощенко М.Л., Демьяненко Т.Ф.* Исследование технологии инновационных продуктов сложного сырьевого состава на основе люпина // Сб. трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2013. С. 79–85.
  14. *Кузнецова Л.М.* Методы биотехнологии в создании новых форм белковой пищи из люпина // XVIII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации работ победителей конкурса грантов для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. СПб., 2013. С. 134.

## Литература

1. *Sipsas S.* Protein concentrates and isolates // Seeding a Future for Grains in Aquaculture Feeds (Proceedings of a Workshop held in Fremantle, Western Australia, 28 May, 2003). P. 7–9.
2. *Pollard N.J., Stoddard F.L., Popineau Y. et al.* Lupin flours as additives: Dough mixing, breadmaking, emulsifying, and foaming // Cereal Chemistry. 2002. Vol. 79. No 5. P. 662–669.
3. Растительный белок / Пер. с фр. В.Г. Долгополова. Под ред. Т.П. Микулович. М., 1991. – 684 с.
4. *Эрикссон Д.Р.* Практическое руководство по переработке и использованию сои. М., 2002. – 672 с.
5. *Телишевская Л.Я., Комаров А.А., Болденко Ю.В.* Ферментные препараты в кормопроизводстве // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. Ю.А. Овчинникова. 2005. Т. 1. № 2. С. 63–67.

6. Патент RU № 2388818, МПК C12N9 / 00, A23K1 / 00, дата приоритета 24.04.2008, опубл. 10.05.2010.

7. *Jeffries T.W.* Biochemistry and genetics of microbial xylanases // *Current opinion in Biotechnology*. 1996. Vol. 7. No 3. P. 337–342.

8. *Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.* Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1985. – 327 с.



**Кузнецова Ольга Валерьевна**  
Факультет компьютерных технологий и управления  
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем  
E-mail: olunchik\_1989@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ**

О.В. Кузнецова

Научный руководитель – доцент Е.Б. Романова

### **Введение**

Необходимость реализации требований рыночной экономики заставляет предприятия постоянно улучшать потребительские свойства и качество изделий при максимальном сокращении сроков их выпуска за счет совершенствования систем автоматизированного проектирования (САПР). Анализ различных САПР, используемых при проектировании электронных устройств (ЭУ), позволяет сделать вывод о том, что существуют возможности сокращения сроков их проектирования и увеличения качества за счет повышения эффективности САПР, в том числе посредством использования трехмерных моделей (3D-модель) печатных узлов.

Использование 3D-модели позволяет наиболее быстро и качественно выполнить и реализовать проект требуемой продукции. Трехмерная модель дает более полную картину в отношении конструкции и работы устройства по сравнению с двухмерной моделью. В связи с этим особую актуальность приобретает задача проектирования ЭУ на основе 3D-модели печатного узла (ПУ) (под печатным узлом понимается плата с установленными на ней электронными компонентами) [1].

Трехмерная модель ПУ включает 3D-модель платы и трехмерные модели электронных компонентов (ЭК), а также детали для них (радиаторы, прокладки и т. д.). Размещение ЭК на плате удобнее выполнять в трехмерном измерении, что дает возможность контролировать их установку друг под другом, а также устанавливать ограничительные (запретные) зоны в соответствии с формой корпуса (секции, или пр.).

В большинстве случаев стандартом при проектировании ЭУ является использование двухмерной модели ПУ. Однако при этом увеличивается время разработки и снижается качество проектирования. В то же время в двухмерном режиме удобнее выполнять трассировку проводников на плате. В связи с этими обстоятельствами разработка и реализация алгоритмов размещения ЭК на плате является актуальной проблемой, решение которой неотъемлемо связано с развитием САПР.

### **Цель и задачи проекта**

Основной целью проекта является разработка методов трехмерного моделирования ПУ в САПР ЭУ и алгоритма размещения ЭК в трехмерном измерении на монтажном поле платы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать САПР, используемые для проектирования ПУ;
- проанализировать современные подходы к 3D-моделированию ЭК;
- разработать методы трехмерного моделирования ПП;
- разработать алгоритм размещения ЭК в трехмерном измерении;
- создать трехмерные модели ПП.

### Методы исследования

В результате проведенного анализа САПР были выбраны две системы, в которых производилась разработка 3D-моделей печатных плат (ПП).

Из машиностроительных САПР выбран программный комплекс SolidWorks, а из САПР ПП система AltiumDesigner-10 компании Altium. Данные системы популярны в нашей стране, обладают удобным интерфейсом, поддерживают большой спектр различных форматов обмена данными.

Для формирования 3D-моделей корпусов ЭК чаще всего применяют ряд существующих подходов:

- формирование 3D-моделей корпусов посредством экструзии;
- метод использования готовых 3D-моделей корпусов в формате STEP;
- создание персональных библиотек 3D-моделей корпусов ЭК.

Все существующие подходы нацелены в основном на создание 3D-моделей корпусов ЭК. Для разработки 3D-модели ПУ помимо 3D-моделей ЭК необходимо создавать 3D-модель конструктива печатной платы. Известные подходы не дают точного решения конкретной задачи, поэтому требуется их анализ и разработка методики применения [3].

При конструировании ПУ алгоритмы применяются для размещения корпусов ЭК и трассировки проводников на плате. Все они предназначены для конструирования в двухмерном измерении, что вполне достаточно лишь для трассировки проводников. При размещении же ЭК на плате необходимо отслеживать высоты их корпусов (проверять, возможна ли установка в блок), поэтому двухмерного режима недостаточно.

В качестве образца разработки печатного узла использована двухмерная модель платы операторской панели ОП300, разработанная в САПР P-CAD 2006 (рис. 1). Операторская панель ОП300 предназначена для управления промышленными контроллерами, узлами автоматики и может применяться в различных областях промышленности для управления технологическими установками.

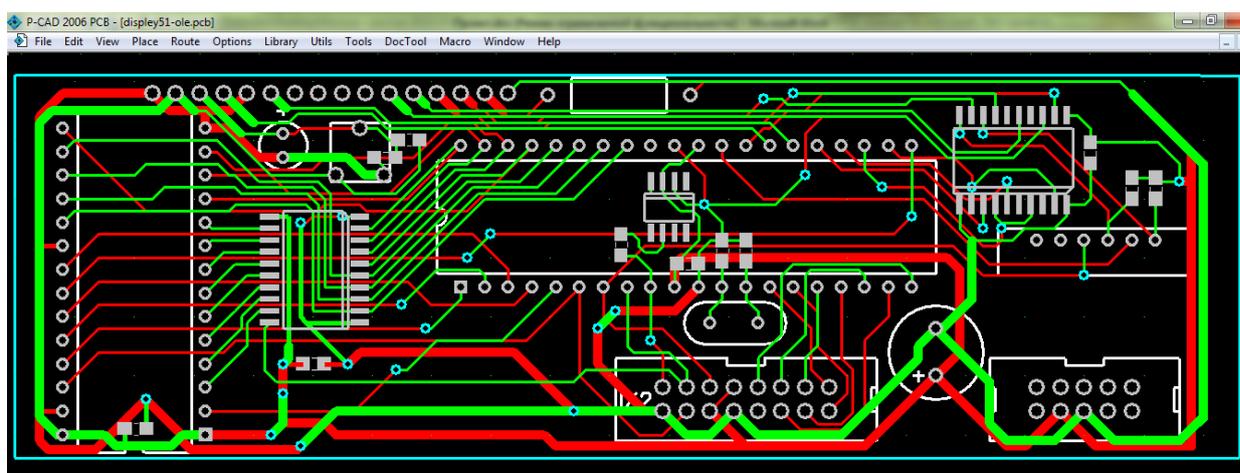


Рис. 1. Топология платы операторской панели ОП300 в системе P-CAD 2006

Разработка методов трехмерного моделирования ПУ и алгоритма размещения ЭК в трехмерном измерении основана на: теории САПР, методах трехмерного моделирования в САПР, теории графов, алгоритмах размещения корпусов ЭК на плате.

## Основные достигнутые результаты

По окончании разработки проекта ожидается получение оригинальных методов трехмерного моделирования ПУ, алгоритма размещения в трехмерном измерении, трехмерных моделей платы операторской панели ОП300.

### Метод 3D-моделирования ПП в системе Altium Designer

В системе AltiumDesigner разработан метод 3D-моделирования ПУ, в основе которого лежит импорт 3D-моделей корпусов в формате STEP. Результатом является реалистичное изображение 3D-модели платы операторской панели ОП300.

Двухмерная модель платы операторской панели ОП300, после осуществления процесса импорта данных из системы P-CAD 2006 в систему AltiumDesigner10, изображена на рис. 2.

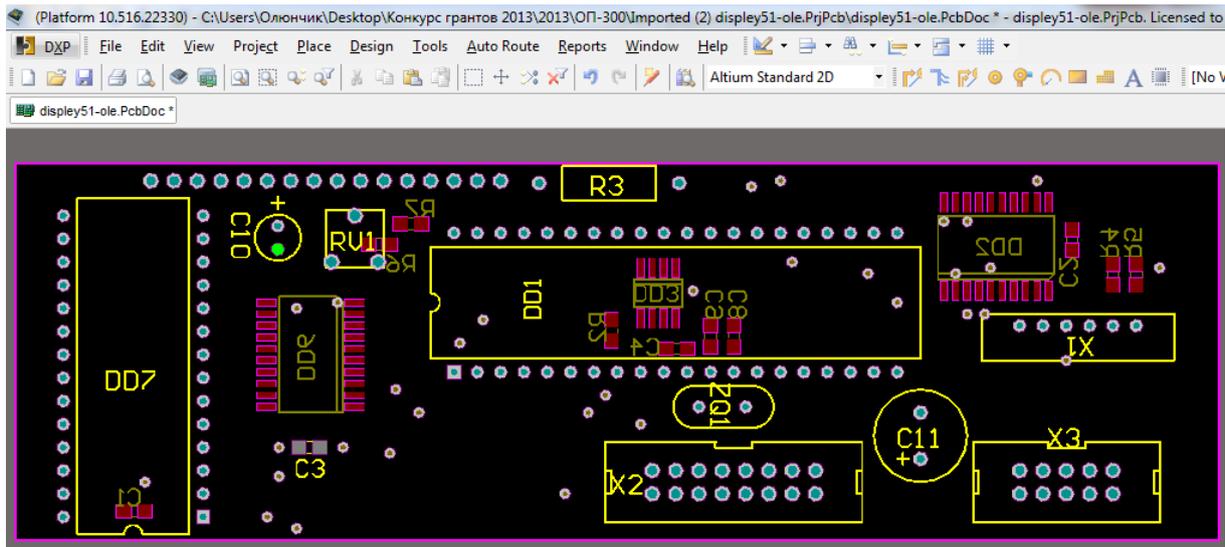


Рис. 2. Топология платы операторской панели ОП300 в системе AltiumDesigner10

Построение реалистичной 3D-модели платы основано на методе добавления к посадочным местам созданных 3D-моделей корпусов ЭК в формате STEP. Подробно данная возможность рассмотрена на примере добавления 3D-модели корпуса «DIP40» микросхемы «AT90S8535-P» к посадочному месту (Footprint) на плате.

Добавление STEP-модели к посадочному месту осуществляется в библиотеке посадочных мест, например «DIG\_IC.PCBLib», с помощью панели «PCB Library». В списке компонентов библиотеки выбирается нужный, в данном случае, - микросхема «AT90S8535-P». Нажатием клавиши «3» переходим в режим 3D-просмотра. Командой «View/ Fit Document» приближаем компонент.

Выбрав команду «Place/3D Body» в диалоговом окне «3D Body» необходимо установить следующие опции: в верхней части окна в области «3D ModelType» выбрать «Generic STEP Model». В поле «Properties» в качестве стороны и слоя расположения модели указать «TopSide и Mechanical 1». В области «SnapPoints» нажать кнопку «Add», тем самым добавив нулевую точку привязки на модели (рис. 3). Для добавления 3D-модели в формате STEP нужно нажать кнопку «Embed STEP Model» в поле «Generic STEP Model» и выбрать файл модели в формате STEP, в данном случае «SW3dPS-DIP40.STEP», затем закрыть окно кнопкой «Ok». Далее надо разместить модель на поле рабочей области и кнопкой «Cancel» выйти из режима размещения.

Двойным щелчком по модели надо снова вызвать окно свойств «3D Body», указать угол поворота вокруг оси X (RotationX)  $90^{\circ}$ , нажать «Ok». Далее следует выполнить команду «Tools/3DBodyPlacement/Position 3DBody». Мышкой указать модель, после чего курсор станет трехмерным. Далее надо подвести его к точке привязки, которая расположена в центре верхней плоскости модели, и щелкнуть левой кнопкой мыши – курсор «прилипнет» к точке привязки. После последовательного нажатия клавиш J, R курсор переместится в начало координат. Для фиксации расположения модели нужно нажать на клавиатуре «Enter». В итоге получается 3D-

модель правильно расположенная относительно посадочного места (рис. 4). Командой «File/Save» надо сохранить изменения в библиотеке.

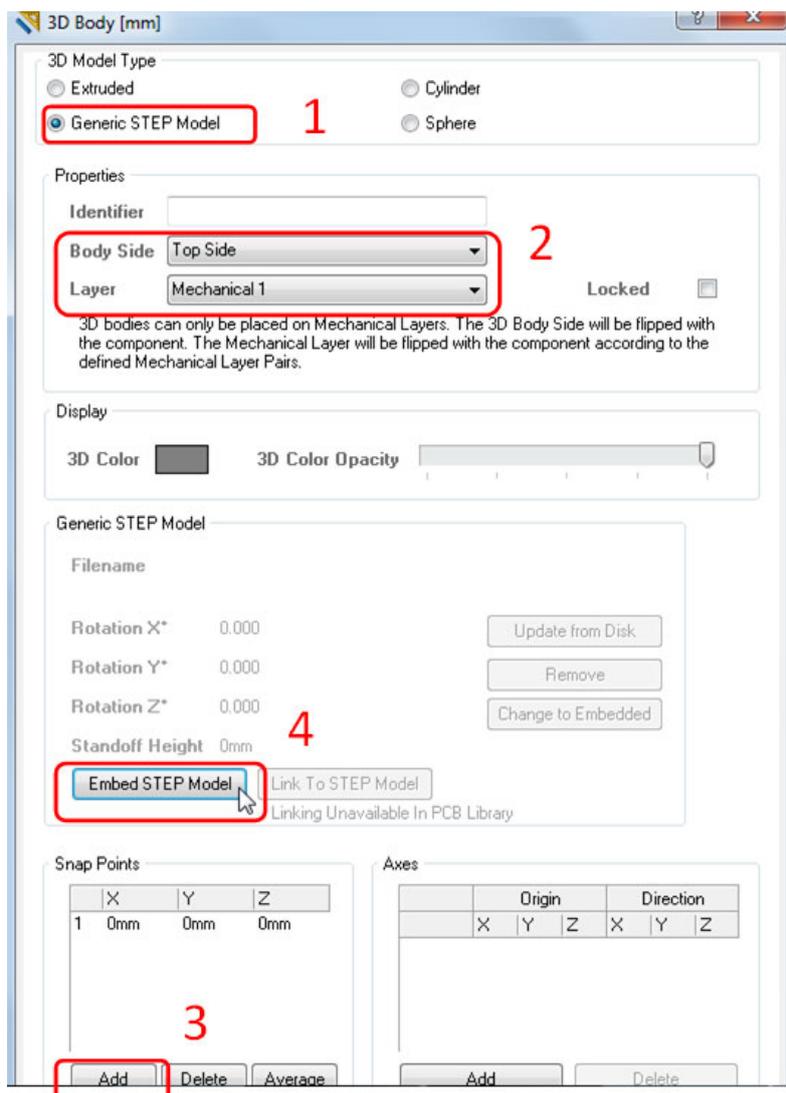


Рис. 3. Диалоговое окно команды «3D-Body»

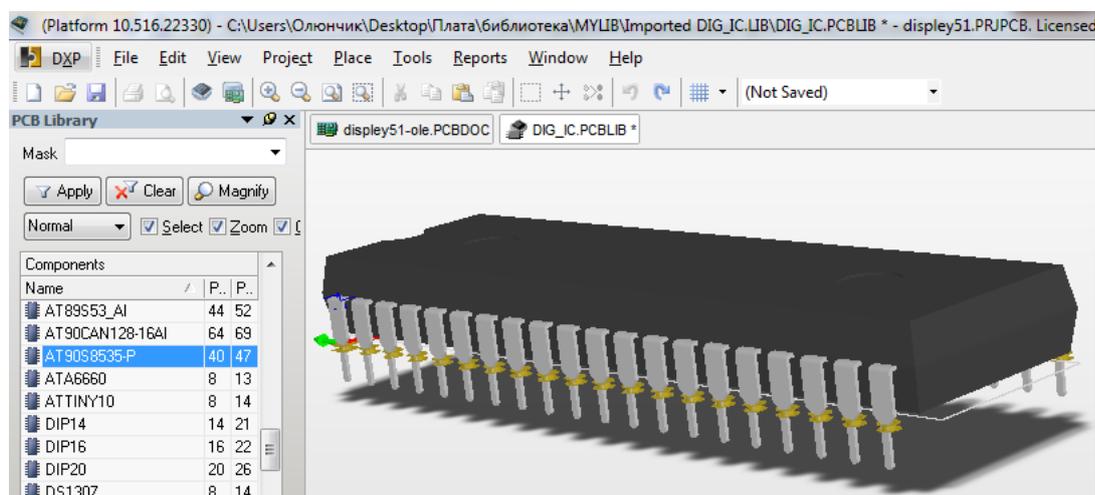


Рис. 4. 3D-модель корпуса микросхемы «AT90S8535-P»

Таким же образом в библиотеке посадочных мест с расширением \*.PCBLib, выбираются все нужные компоненты и подключаются к посадочным местам 3D-модели в формате STEP.

Для того чтобы обновить 3D-модель ПП, нужно на панели «PCB Library» нажать правой кнопкой «мыши» и выбрать команду «Update PCB WithAll» и все внесенные изменения в библиотеках отразятся на 3D-модели платы.

3D-модели корпусов разъемов, резисторов и конденсаторов поверхностного монтажа были созданы мной вручную в САПР SolidWorks. 3D-модели корпусов других ЭК, таких как микросхемы с типом корпусов «SO8, SO20, DIP28, DIP40», штыревых конденсаторов и резисторов были найдены в формате STEP. В результате добавления к посадочным местам 3D-моделей корпусов ЭК в формате STEP, сохранения изменений и обновления библиотек получим реалистичное изображение 3D-модели платы (рис. 5).

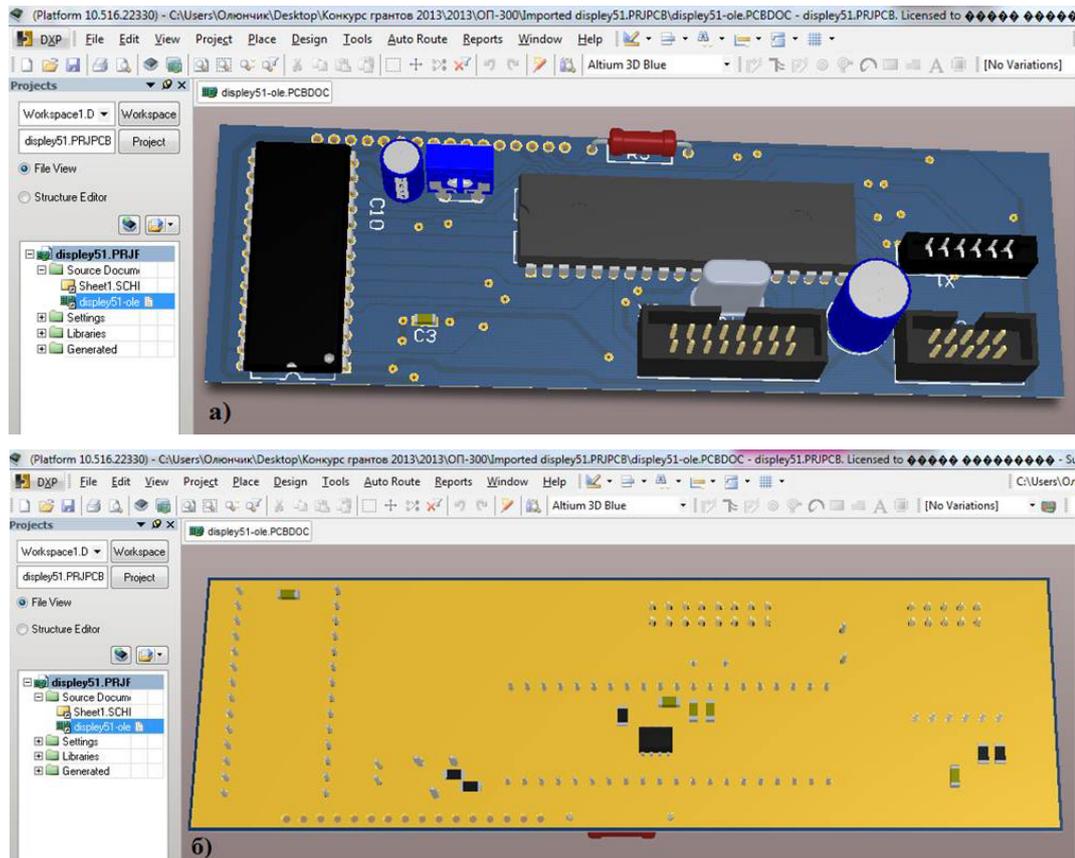


Рис. 5. Реалистичное изображение 3D-модели платы в системе AltiumDesigner:  
а – верхняя сторона платы; б – нижняя

### Метод 3D-моделирования ПП в системе SolidWorks

В системе SolidWorks разработан метод 3D-моделирования ПП, основанный на: импортировании данных из САПР ПП и использовании 3D-моделей корпусов ЭК, созданных непосредственно в системе SolidWorks. Результатом разработки метода 3D-моделирования является 3D-модель платы операторской панели ОП300.

В базовый пакет SolidWorks входит модуль CircuitWorks – это двунаправленный транслятор данных в формате IDF между системами проектирования ПП (ECAD) и SolidWorks. CircuitWorks производит чтение IDF файла (промышленный стандарт для обмена данными между ECAD системами) и создает в SolidWorks 3D-сборку, состоящую из модели платы и моделей ЭК. Если элементная база платы имеется в библиотеке электронных компонентов CircuitWorks, то транслятор будет использовать библиотечные детали и размещать их на плате в соответствии с заданными в IDF файле координатами. При отсутствии компонента в базе данных CircuitWorks – автоматически создаст его габаритную модель (прямоугольный параллелепипед) и тоже разместит на плате.

В SolidWorks по умолчанию включены трансляторы, обеспечивающие импорт/экспорт моделей и чертежей большинства встречающихся на практике форматов (STEP, IGES, IDF, PDF

и др.). Рассмотрим два способа импорта данных: в формате STEP и в формате IDF, которые, в свою очередь, были экспортированы в САПР SolidWorks.

При исследовании формата IDF (.brd и .pro), выявлено, что файлы IDF содержат основную информацию о форме платы, положении и размере отверстий с металлизацией и без нее, а также о размещении и основной форме компонентов. Компоненты взаимосвязаны с платой, что исключает их форматирование и перемещение.

Если все передаваемые файлы корректны, на экране CircuitWorks получим печатную плату с прорисованными отверстиями и габаритами компонентов (рис. 6).

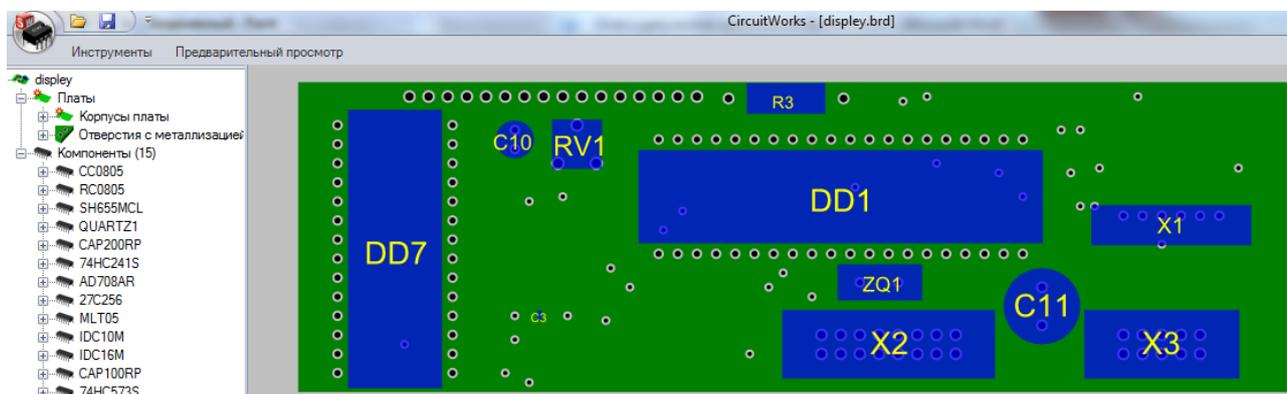


Рис. 6. 3D-модель платы операторской панели, полученная в результате импорта данных в формате IDF

Слева находится дерево ПП, в нем последовательно идут: контур ПП, монтажные не металлизированные отверстия, металлизированные отверстия, компоненты. Каждый элемент дерева имеет определенные свойства, их можно посмотреть по правой клавише, отредактировать или отфильтровать. Компоненты объединены в группы с одинаковым посадочным местом. У группы и каждого отдельно взятого компонента также присутствуют свойства, которые можно редактировать. Компоненты подсвечиваются на плате при их выделении в дереве.

В результате импортирования каждая 3D-модель ЭК представляет собой деталь, состоящую из совокупности 3D-элементов, полученных вытяжкой, в основном в виде параллелепипеда и имеет упрощенный вид (рис. 7).

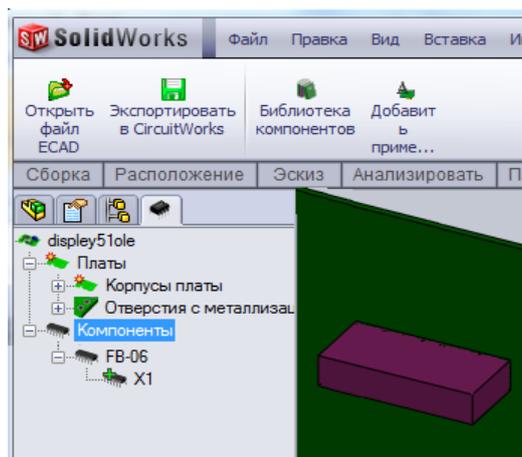


Рис. 7. Упрощенная 3D-модель разъема

Формат IDF не обеспечивает полного представления о собранной плате. Его назначением не является описание ее функций и электрических свойств. Поэтому его следует использовать в качестве механизма преобразования эскизов собранной платы из одной системы компоновки в другую или в качестве механизма для координирования компоновки платы с системами производства, сборки, тестирования и детального документирования.

Для построения реалистичного изображения 3D-модели платы в системе SolidWorks используем импорт данных о плате с помощью формата STEP. Файлы в формате STEP передают информацию о геометрии и цветах тела, гранях и его топологии. Данный формат следует использовать для обмена точными данными, долговременного хранения и доступа, сертифицированной поставки данных, междисциплинарным обменом данных.

В поисковой сети интернет мной были найдены готовые 3D-модели корпусов некоторых ЭК в формате STEP, такие как микросхемы с типом корпусов «SO8, SO20, DIP28, DIP40»; штыревые конденсаторы и резисторы; 3D-модели корпусов разъемов. Резисторы и конденсаторы поверхностного монтажа были созданы мной вручную в САПР SolidWorks. На рис. 8 изображен пример 3D-модели разъема «IDC-16М».

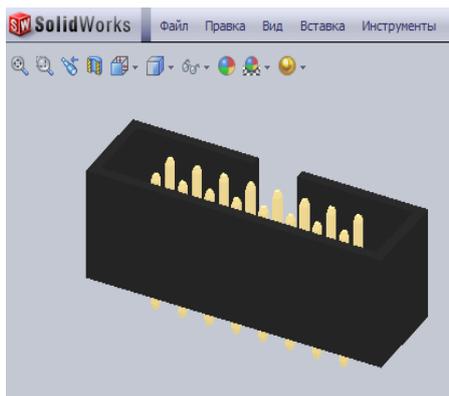


Рис. 8. 3D-модель разъема «IDC-16М» в SolidWorks

Для получения реалистичного изображения платы необходимо ее импортировать из САПР ПП в формате STEP, а затем открыть данный файл в системе SolidWorks. С помощью инструментов этой системы необходимо произвести доработку данных – добавить на плату созданные трехмерные модели ЭК. После проведения процессов конвертации и добавления 3D-моделей корпусов ЭК получаем реалистичное изображение 3D-модели операторской панели ОП300 (рис. 9).

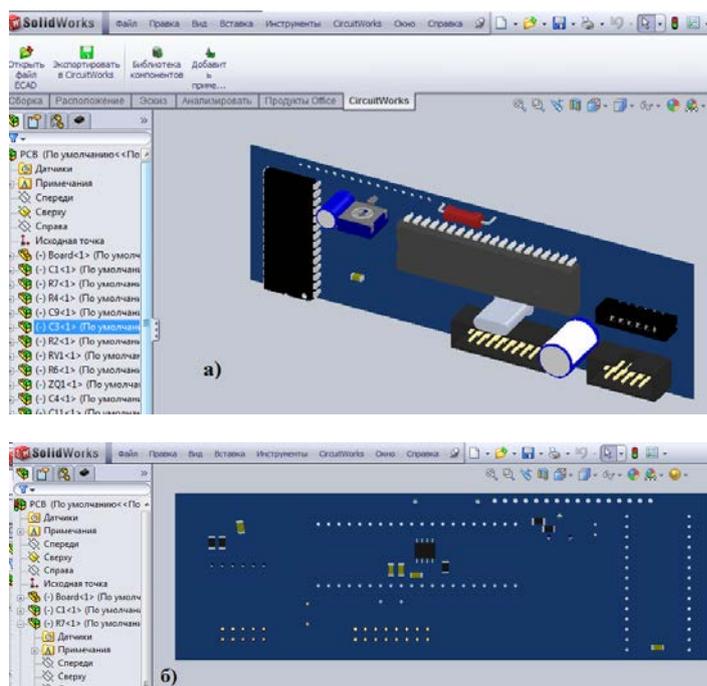


Рис. 9. Реалистичное изображение 3D-модели платы в системе SolidWorks:  
а – верхняя сторона платы; б – нижняя

### Алгоритм размещения ЭК в трехмерном измерении

Алгоритмы размещения ЭК можно свести в основные группы: алгоритмы для решения задач математического программирования, являющихся моделями задачи размещения; последовательные и итерационные алгоритмы; а также алгоритмы, использующие непрерывно-дискретные методы оптимизации [1].

Последовательные алгоритмы предусматривают первоначальное размещение на плате части компонентов. Решающее правило большинства этих алгоритмов основано на предположении, что наиболее связанные элементы следует располагать максимально близко друг к другу. На каждом шаге алгоритма в соответствии с некоторой оценкой выбирают очередной элемент и позицию для его установки. В качестве первоначально закрепленных на плате компонентов, обычно, выбирают разъемы, которые устанавливают по краям платы. Последовательные алгоритмы размещения требуют небольших затрат машинного времени.

Исходными данными для них являются:

- матрица  $R$  (матрица взвешенных связей), множество индексов размещенных  $I_k$  и неразмещенных  $I'_k$  компонентов, множество индексов занятых и свободных позиций  $T_k$  и  $T'_k$ ;
- $K$  – общее количество ЭК;
- $H$  – вектор-столбец взвешенных связей  $H = \{h_i / i=1, K\}$  выводов компонентов  $e_i$  с компонентом  $e_0$  (рис. 10).

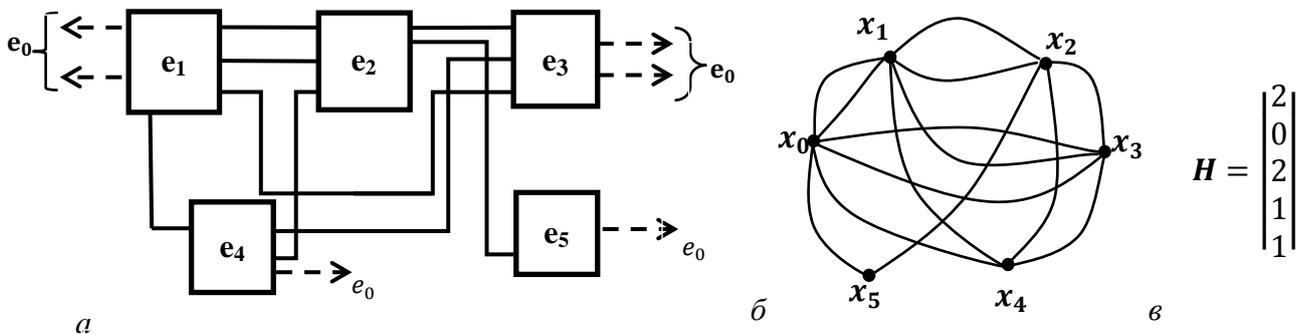


Рис. 10. Фрагмент электрической схемы, мультиграф схемы и вектор  $H$

Модель монтажного поля (МП) описывается матрицей расстояний:

$$D = \|d_{ij}\|_{n \times m}, \tag{1}$$

где  $n=m=K$  – общему числу компонентов.

Плоскость МП разбивают на элементарные площадки, стороны которых равны шагу размещения компонентов по соответствующему направлению. Каждой площадке ставят в соответствие вершину графа решетки. Две вершины соединены ребром, если между соответствующими элементарными площадками можно провести соединения с учетом метрических и топологических параметров типовых конструкций, устанавливаемых в данном МП. Расстояние между двумя смежными вершинами в графе  $G_R$  называется шагом сетки и принимается равным 1. При ортогональном размещении расстояние между вершинами рассчитывается по выражению:

$$d_{ij} = |S_i - S_j| + |t_i - t_j|, \tag{2}$$

где  $S$  и  $t$  – направления вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Для регулярного МП в качестве модели поля размещения используют граф решетки платы, представленный на рис. 11.

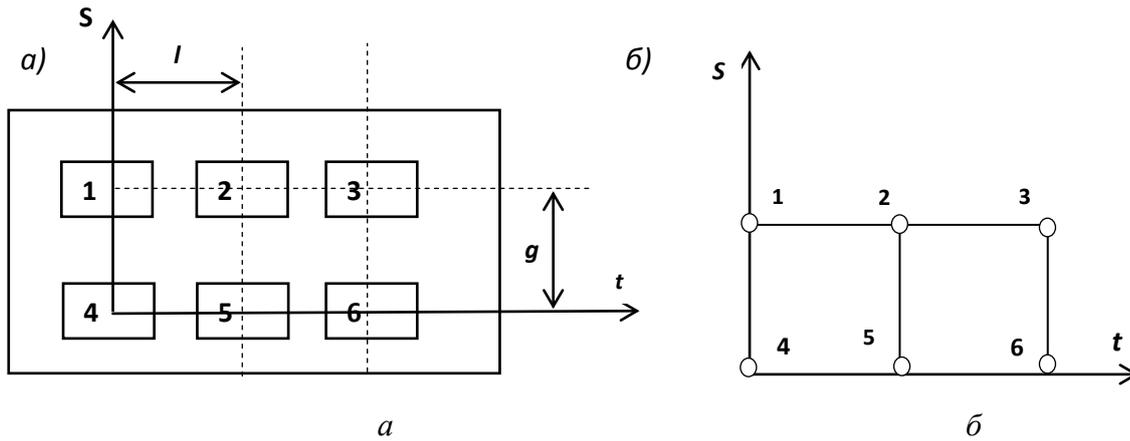


Рис. 11. а – модель монтажного поля; б – граф решетки платы

Задача размещения сводится к тому, чтобы на множестве установочных вакантных позиций  $T'_k$  на МП, разместить множество элементов схемы  $E = \{e_1, e_2 \dots e_n\}$ . Под МП понимается область ПП (без вырезов, зон крепежа и тому подобных областей), на которой будут размещаться ЭК, добиваясь минимизации целевой функции, которая выражает критерий размещения:

$$\min_{f \in T'_k} \left\{ \sum_{j \in I_k} r_{i,j} * d_{f,t(j)} + m_f * h_i \right\}, \quad (3)$$

где:  $f$  – свободная позиция, принадлежащая множеству незанятых позиций  $T'_k$ ;  $j$  – элемент множества неразмещенных компонентов  $I_k$ ;  $r_{ij}$  – количество взвешенных связей очередного размещаемого элемента;  $d_{f,t(j)}$  – расстояние от размещенного компонента до размещаемого в позицию  $f$ ;  $m_f$  – номер вертикального ряда, в котором расположен элемент  $e_f$ ;  $h_i$  – количество взвешенных связей размещаемого элемента с  $e_0$  (разъемом).

### Основные этапы алгоритма размещения

1. Ввод общего количества компонентов  $K$ .
2. Множество индексов размещенных компонентов  $I_k = \{0\}$ , при условии, что  $e_0$  – разъем, и его устанавливают на плату до начала выполнения алгоритма.
3. Множество индексов неразмещенных компонентов  $I'_k = [1, \dots, K]$ .
4. Ввод значений взвешенных связей в квадратную матрицу  $R$  размерности  $K$ , для задания графа схемы. Например, по схеме на рис. 10 матрица имеет вид:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

5. Определение индекса очередного размещаемого ЭК, обозначим его  $J$ .

В процессе размещения ЭК на МП оценку степени связности обычно производят, используя один из следующих критериев [2]:

Если на плате размещен только один из компонентов, то для оценки степени связности используют критерий максимума количества взвешенных связей:

$$\max_{i \in I'_k} \{r_i, j_k\}, \quad (4)$$

где  $r_i$  – связь размещенного элемента с неразмещенными,  $j_k$  – номер столбца матрицы  $R$ .

Если количество свободных позиций  $Z$  больше количества неразмещенных элементов  $A$ , то рекомендуется использовать критерий максимума суммы взвешенных связей:

$$\max_{i \in I'_k} \{ \sum_{j \in I_k} r_{i,j} \}, \tag{5}$$

где  $r_{ij}$  – элемент матрицы взвешенных связей ( $R$ ).

Если количество свободных позиций не больше количества неразмещенных элементов, то рекомендуется использовать критерий максимума разности связей между размещенными и неразмещенными компонентами.

$$\max_{i \in I'_k} \{ \sum_{j \in I_k} r_{i,j} - \sum_{j \in I'_k} r_{i,j} \}, \tag{6}$$

6. Определение позиции (места на плате) для установки размещаемого ЭК.

Разъем размещается в первую позицию на монтажном поле платы (при необходимости плату нужно развернуть). В этом случае множество индексов занятых позиций  $T_k = [1]$ , а свободных –  $T'_k = [2, \dots, M]$ .

Обозначим размеры монтажного поля  $L_{мп} \times H_{мп}$ . Плату необходимо разбить на прямоугольные ячейки: длина стороны которой  $L_я$  равна длине наиболее длинномерного корпуса электронного компонента (ЭК) плюс зазор между ними (например 5 мм); ширина стороны ячейки  $H_я$  равна ширине наиболее широкого корпуса ЭК плюс зазор между ними. Количество ячеек по длине и ширине монтажного поля рассчитываются следующим образом:  $L_{мп}/L_я=L$  и  $H_{мп}/H_я=H$ . При этом все компоненты на МП будут ориентированы одинаково.

Составим матрицу расстояний по модели МП, используя формулу (2). Например, если на плате имеется шесть ячеек, расположенных в два ряда по три в каждом (рис. 11а), то матрица расстояний будет иметь следующий вид:

$$D_R = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Выбранный элемент устанавливаем в позицию, которая удовлетворяет выражению (3).

Для алгоритмизации размещения ЭК в 3D-измерении необходимо определить позиции (места на плате) для его установки с учетом высот корпусов ЭК и высот над платой (что определяется конфигурацией модуля более высокого уровня, например, формой корпуса блока). В данном проекте рассматривается вариант с односторонним размещением ЭК на плате.

Если высота над платой равномерна (при установке платы в модуль более высокого уровня высота над поверхностью платы в любой точке одинакова), то выполняется:

- ввод значения высоты над платой  $B_{nl}$  (с учетом зазора);
- ввод значений высот корпусов ЭК  $\{B_1, B_2, \dots, B_v\}$  (где  $v$  – количество однотипных корпусов ЭК, размещаемых на МП);
- сравнение значений высот корпусов с  $B_{nl}$ . Если  $B_i > B_{nl}$ , то надо изменять параметры конструкции: либо выбрать другой тип корпуса, либо подобрать другую форму модуля более высокого уровня (корпуса блока). Если  $B_i \leq B_{nl}$ , то выбранный элемент необходимо установить в позицию, которая удовлетворяет выражению (3).

В случае, если высота над платой неравномерна (при установке платы в корпус ступенчатой формы), рекомендуется применить алгоритм плотного размещения разногабаритных элементов на плате [5]. Суть его заключена в следующем. ЭК, выбранный для установки, размещается на такое место, чтобы его правая граница была минимально удалена от начала полубесконечной ленты. При наличии нескольких таких мест среди них выбирается такое, при котором длина границы соприкосновения устанавливаемого ЭК с уже установленными и границей полубесконечной ленты была бы максимальной. Например, (рис. 12) имеется  $k-1$  размещенных ЭК, положение которых по оси  $x$  определяется параметром  $Sx_{k-1}$  ( $Sx$  – текущее значение) и размещаемый  $k$ -й ЭК. Для его установки находится такое место размещения, чтобы правая его граница создавала минимальное значение  $Sx_k$ . Если таких мест

несколько, то выбирается то из них, на котором данный ЭК имел бы максимальное по протяженности соприкосновение с уже установленными ЭК или с границей ленты размещения.

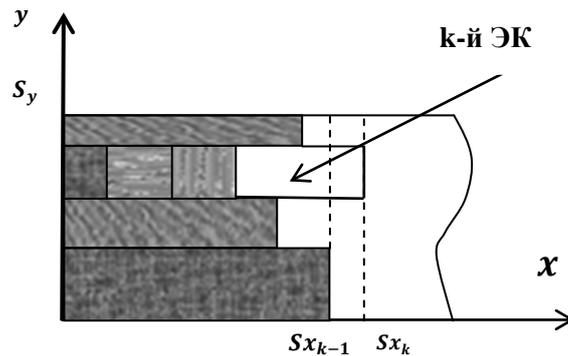


Рис. 12. Оптимальный вариант размещения ЭК

В этом алгоритме размещения (так же, как и в других) используется двумерная система координат. Для размещения ЭК в трехмерном пространстве представленный алгоритм необходимо преобразовать, выполнив следующие операции:

- ввести высоты устанавливаемого корпуса ЭК:  $B_i$ ;
- все области платы, на которых высота над ней меньше  $B$ , назначить занятыми;
- затем выполнить алгоритм для размещения в двумерном пространстве.
- если не существует ни одного места на МП, куда можно разместить выбранный ЭК, то надо изменить параметры конструкции.

7. Во множество индексов занятых позиций  $T_k$ , добавить индекс очередной занятой позиции. Исключить из множества индексов свободных позиций  $T'_k$ , индекс очередной занятой позиции.

8. Во множество элементов  $I_k$ , добавить индекс размещенного элемента. Из множества элементов  $I'_k$  исключить индекс очередного размещенного элемента.

9. Выполнить проверку – все ли элементы размещены. Если  $I'_k = 0$ , то перейти к пункту 10, иначе – к пункту 5.

10. Конец алгоритма.

Разработанный алгоритм позволит автоматизировать размещение корпусов ЭК с учетом их высот (рис. 13). Это позволит увеличить скорость проектирования ПП и уменьшить количество ошибок на стадии проектирования.

### Области возможного использования результатов проекта

Разработанные методы трехмерного моделирования ПУ и алгоритм размещения ЭК в трехмерном пространстве позволят значительно увеличить скорость разработки ЭУ, повысить их качество и уменьшить стоимость изготовления.

Разработанные 3D-модели плат могут быть использованы для проектирования трехмерной конструкции операторской панели в машиностроительных и электротехнических САПР; для 3D-моделирования кабелей и жгутов в электротехнических САПР (для соединения плат между собой и с внешними устройствами), а также при решении таких задач, как сквозное проектирование электронных устройств в едином информационном пространстве и при формировании прототипов деталей и конструкций электронных устройств.

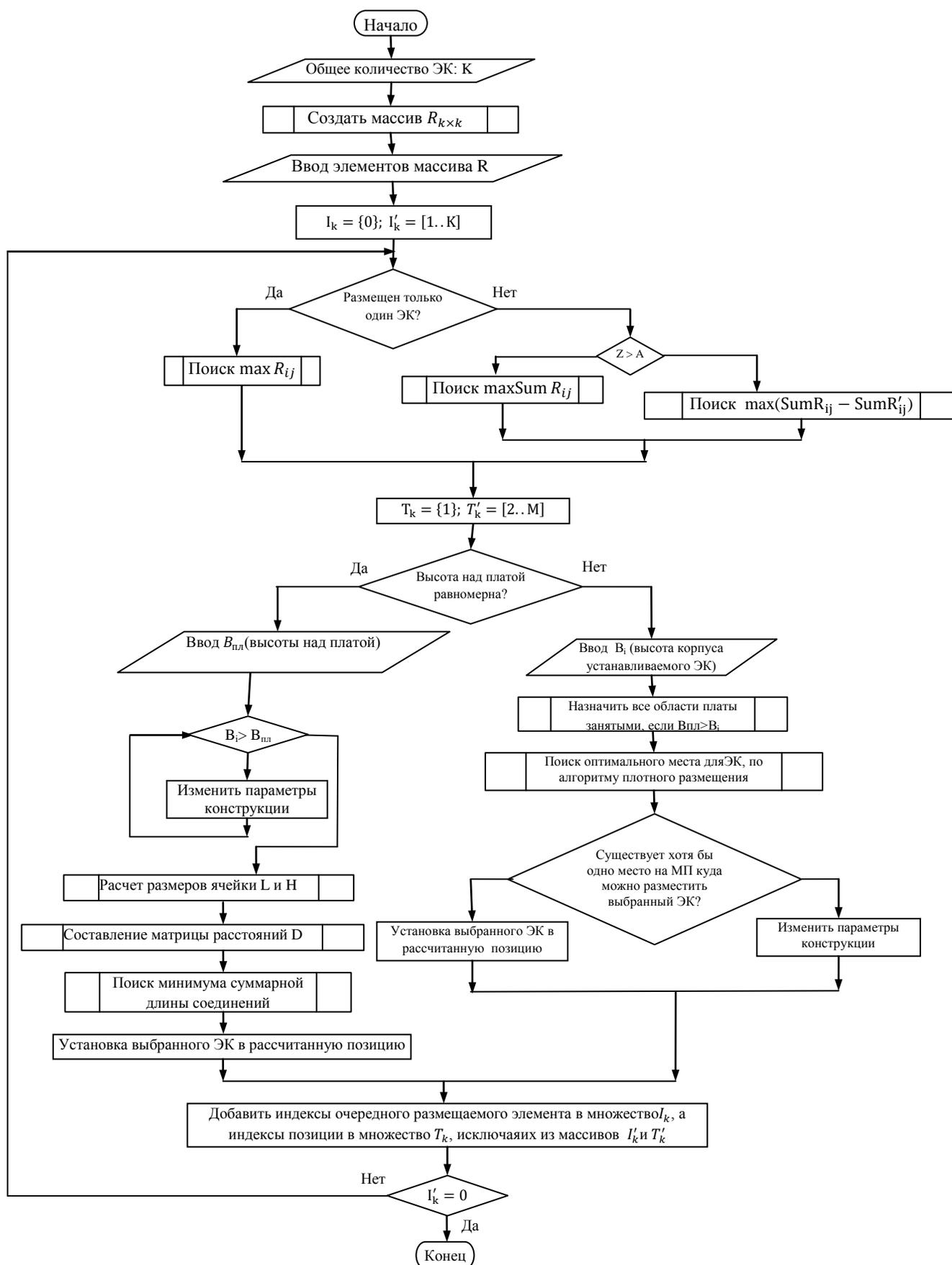


Рис. 13. Разработанный алгоритм размещения ЭК на монтажном поле платы

3D-модель платы можно использовать при виртуальной компоновке ЭУ (для локализации критических мест пересечения или сближения помеченных поверхностей), а также для их последующего анализа.

Применение алгоритма позволит увеличить скорость проектирования ПУ при уменьшении количества ошибок, а также автоматизировать размещение корпусов ЭК с учетом их высот. Данный алгоритм может быть реализован в виде отдельной программы или его можно встроить в САПР ПП, поддерживающие трехмерное моделирование (Altium Designer, KiCAD, CADSTAR) [4].

3D-модели плат, полученные разработанными методами 3D-моделирования, несут не только реальную пространственно-объемную информацию, но и позволяют производить в среде используемой САПР всевозможные манипуляции, которые определяются производственной необходимостью и ее возможностями (всевозможные расчеты и автоматизированная подготовка производства).

Реалистичное изображение 3D-модели ПП можно использовать при монтаже компонентов, для установки их друг под другом (компонент поверхностного монтажа можно расположить под штыревым компонентом, устанавливаемым на печатную плату с зазором). При использовании разработанных методов в Altium Designer появляется возможность автоматизированного контроля процесса установки компонентов по высоте друг под другом, а также установки высоких электронных компонентов в корпус.

Разработанные методы могут быть использованы для формирования 3D-моделей ПУ, которые можно применить для 3D-компоновки изделия в машиностроительных САПР, а также для 3D-моделирования кабелей и жгутов в электротехнических САПР (для соединения плат между собой и с внешними устройствами). Полученные 3D-модели ПУ могут быть использованы при решении таких задач как: сквозное проектирование ЭУ в едином информационном пространстве, формирование прототипов деталей и конструкций ЭУ.

## Публикации

1. Гатчин Ю.А., Кузнецова О.В., Романова Е.Б. Рекомендации по размещению электронных компонентов на печатной плате // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям “IS&IT’13”. Молодежная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии – 2013». Т. 3. М., 2013. С. 36-37.
2. Кузнецова О.В., Романова Е.Б. Трехмерное моделирование печатного узла // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. СПб., 2011. № 6 (76). С. 139.

## Литература

1. Бондарик В.М. Системы автоматизированного проектирования. Курс лекций: Учеб. пособие. Минск, 2006. – 272 с.
2. Гатчин Ю.А., Кузнецова О.В., Романова Е.Б. Рекомендации по размещению электронных компонентов на печатной плате // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям “IS&IT’13”. Молодежная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии – 2013». Т. 3. М., 2013. С. 36–37.
3. Кофанов Ю.Н., Сарафанов А.В., Трегубов С.И. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: Электронное учеб. пособие. Красноярск, 2008.
4. Кузнецова О.В., Романова Е.Б. Трехмерное моделирование печатного узла // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. СПб., 2011. № 6 (76). С. 139.
5. Кокотов В.З. Алгоритм плотного размещения разногабаритных элементов на плате // Наука и образование: Электронный журнал. 2005. № 9.



**Кухтевич Игорь Владимирович**  
Факультет точной механики и технологий  
Кафедра нанотехнологий и материаловедения  
E-mail: ba@inbox.ru

## МИКРОФЛЮИДНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ МИКРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

И.В. Кухтевич

Научный руководитель – д. т. н. А.А. Евстапов  
(Институт аналитического приборостроения РАН)

### Введение

Проведение всех стадий и этапов анализа жидких проб или биологических объектов в одном компактном устройстве – суть концепции «лаборатории на чипе» (*lab on a chip*), упоминание о которой впервые появилось в конце прошлого века [1]. Ее основой является микрофлюидное устройство (МФУ), которое может содержать следующие функциональные элементы: каналы, смесители, нагреватели, фильтры, загрузочные/сливные резервуары, реакционные камеры, устройства разделения пробы, камеры сбора фракций, сенсоры и т. д. Все эти элементы предназначены для выполнения аналитических, технологических и других операций с пробой. Однако создание полностью интегрированного МФУ требует значительных финансовых затрат, что связано с необходимостью изготовления и интегрирования всех функциональных элементов в микромасштабе, поэтому на сегодняшний день на МФУ обычно реализуются отдельные операции с пробой.

Планарной реализацией МФУ без вспомогательных элементов (гидравлический интерфейс, фитинги, и т. д.) является микрофлюидный чип (МФЧ). Одним из подходов к дифференциации микрочастиц по размерам является техника гидродинамического разделения в потоке (*fluid only*) [2–4]. Гидродинамическое разделение частиц применительно к МФЧ заключается в том, что они дифференцируются по их траекториям в реакционной камере МФЧ. При прохождении частиц через подводящий канал и переходе в реакционную камеру происходит перепад давления, что обуславливается существенным различием поперечных сечений канала и реакционной камеры. Частицы имеют разные размеры и массу, поэтому траектории их движения в реакционной камере МФЧ оказываются различными, даже если они были одинаковыми в подводящем канале. Данный подход позволяет проводить разделение микрочастиц, обладающих различными механическими параметрами (размер, масса).

Помимо этого МФУ являются востребованными на рынке. Так, по мнению экспертов (<http://www.yole.fr/>), рост рынка данных устройств в ближайшие пять лет составит более чем 20 %, в 2016 г. превысит 5 млрд долларов и продолжит увеличиваться.

Таким образом, разработка и изготовление МФЧ для гидродинамического разделения микрочастиц в потоке представляются весьма актуальными.

### Литературный обзор

Основными тенденциями развития современных МФУ для анализа и исследования биологических объектов являются [5–9]:

- миниатюризация МФУ, за счет повышения доступности использования современных техник изготовления, применяемых в микро- и нанотехнологиях (лазерная и ионная литография, фемтосекундная лазерная абляция и др.);
- увеличение производительности за счет параллельного выполнения однотипных операций/последовательностей с пробой;
- контроль всех процессов и стадий реализуемых в МФУ;

- проведение анализа/исследования с регистрацией результатов в реальном времени;
- снижение стоимости анализа/исследования на МФУ за счет уменьшения объема пробы и количества используемых реагентов, а также применения новых методик (например, безметочных);
- снижение стоимости МФУ за счет использования дешевых полимерных и бумажных материалов;
- интеграция в МФУ микро- и наноразмерных структур в качестве новых функциональных элементов (ловушки, нановискеры и др.);
- совмещение МФУ с современными аналитическими системами (масс-спектрометрами, конфокальными лазерными сканирующими микроскопами, атомно-силовыми микроскопами, сканирующими ближнепольными оптическими микроскопами и др.);
- увеличение информативности измерений за счет увеличения чувствительности применяемых методов регистрации/детектирования, интегрирования новых сенсорных элементов и совершенствования методик постановки экспериментов на МФУ.

Классификация МФУ по методам регистрации/детектирования объектов исследования, применяемым в совокупности с данными устройствами, позволяет выделить следующие их основные группы, распространенные в микрофлюидике:

- оптические (оптическая и флуоресцентная микроскопия, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, двухфотонная сканирующая лазерная микроскопия (КЛСМ), микроскопия фазового контраста и пр.);
- сканирующие зондовые (атомно-силовая микроскопия (АСМ) и пр.);
- электрические (импедансометрия и пр.).

Примером работы, в которой речь идет об оптической микроскопии, и ее применении в микрофлюидике, является обзор [10], посвященный вопросам оценки скорости микрочастиц. Авторы предлагают использовать оптическую, не интрузивную технику измерений, позволяющую детально измерять поле потока в микрофлюидных устройствах. В частности, в обзоре обсуждаются такие теоретические и практические вопросы как: типовая оптическая установка для данной техники; свойства объективов микроскопа; оптические фильтры; отбор и концентрация частиц; освещение потока частиц; разрешение системы; методы анализа данных.

Другой пример использования МФУ и оптической микроскопии приводится в статье [11], где авторы демонстрируют автоматизированную микрофлюидную систему, способную регистрировать деформацию отдельных клеток со скоростью около 2000 клеток/с. В основе ее лежит метод гидродинамической фокусировки за счет различия инерционных сил. Принцип работы системы заключается в доставке клеток по оси симметрии канала в центр перекрестия, где происходит их деформация при взаимодействии со встречным потоком. При этом выполняется регистрация изменения формы каждой клетки с использованием высокоскоростной камеры, что позволяет получить количественную оценку параметров.

В статье [12] авторы представили МФУ и автоматизированный оптический микроскоп для регистрации отдельных клеток в потоке, который позволяет проводить скрининг больших популяций (> 100 млн), обеспечивает необходимую чувствительность во время регистрации изображений без их размытия и обладает возможностью непрерывной высокоскоростной записи в реальном времени.

Высокопроизводительная «биофизическая» поточная цитометрическая техника, реализуемая в МФУ в сочетании с оптической микроскопией для измерения времени прохождения отдельных клеток крови через сеть разветвленных микроканалов, представлена в статье [13]. Для демонстрации ее клинической значимости авторы использовали клетки, подверженные заболеваниям (сепсис и лейкостаз), при которых их механические свойства приводят к микрососудистой непроходимости.

Следующий пример сочетания МФУ и оптической микроскопии приведен в статье [14], посвященной исследованию упругих свойств клеток. Авторы отмечают, что использование методов, основанных на фотофорезе микрочастиц, имеет большой потенциал, так как не требует специальных реагентов (например, красителей) для идентификации клеток, позволяет

определять ее фенотип и осуществлять обнаружение заболеваний. Однако, низкая пропускная способность, связанная с необходимостью изоляции и исследования отдельной клетки, существенно ограничивает их применение. Для увеличения производительности авторы предлагают использовать однопучковый метод, при котором сила, вызванная электромагнитным полем, прикладывается анизотропно для растяжения эритроцитов в потоке, а регистрация осуществляется при помощи CCD камеры (Charge-Coupled Device) методом оптической микроскопии.

Такое явление как аутофлуоресценция (АФ) довольно широко распространено в живой природе. Среди биологических объектов АФ, в частности, обладают клеточные органеллы, такие как лизосомы и митохондрии [15]. Как показали исследования, АФ органелл может обеспечивать важную информацию о клетке и происходящих в ней биологических процессах. Например, АФ митохондрий может отражать метаболический статус, в то время как АФ лизосом может быть индикатором пролиферативной активности и возраста клетки [16]. Кроме того, в процессе патологической трансформации нормальных клеток определенные изменения происходят в фенотипе и генотипе клетки, что может приводить к определенным изменениям в клеточной АФ.

Пример успешного применения комбинации КЛСМ и МФУ для регистрации АФ клеток крови, приведен в статье [17]. Была представлена установка, которая использовалась для разделения клеток в МФУ по принципу АФ (сортировка нормальных и трансформированных клеток), а также для изучения процессов клеточного лизиса и апоптоза. С помощью КЛСМ была зарегистрирована АФ одиночных клеток при возбуждении лазером, также удалось различить эритроциты и гранулоциты по АФ-сигналу.

Комбинация МФУ и двухфотонной сканирующей лазерной микроскопии (ДЛСМ) представлена в статье [18]. Авторы приводят пример МФУ для *in vitro* анализа, которое можно имплантировать в череп живых животных с целью локальной доставки химических препаратов и наблюдения в течение длительного времени нервных клеток мозга методом ДЛСМ. Данное устройство состоит из гидрогеля и полидиметилсилоксана (ПДМС), в котором изготовлены трехмерные микроканалы для локальной доставки химических препаратов. Устройство имплантировалось в мозг живой мыши, а затем осуществлялось наблюдение при помощи ДЛСМ.

В другой статье [19] также приводится пример совмещения микрофлюидных технологий и ДЛСМ. Авторы продемонстрировали подход к неинвазивной и высокопропускной иммобилизации физиологически активных объектов, таких как *C. Elegans*, без использования анестезии или охлаждения, но обладающей сопоставимой стабильностью даже для самых требовательных задач. Были проведены наблюдения и манипуляции на субклеточном уровне путем использования ДЛСМ и фемтосекундной лазерной микрохирургии.

Сочетание МФУ с последними достижениями в области флуоресцентной микроскопии обеспечивает уникальную возможность для работы с живыми клетками и изучения сложных взаимосвязей в сигнальных цепях. Использование подобного подхода позволяет проводить визуализацию на молекулярном уровне в одиночной клетке, что способствует определению динамических свойств биологических систем и позволяет оценить тонкие клеточные механизмы регуляции [20].

Один из примеров использования вышеописанной комбинации приводится в статье [21]. Для изучения динамических свойств митохондрий в клетках эндотелия капилляров было применено сочетание КЛСМ и специально разработанного МФУ для независимой подачи двух красителей с разных сторон одиночной клетки.

Другой пример сочетания МФУ и флуоресцентных методов для анализа сигнальных цепей приведен в статье [22], в которой описано исследование поведения рецептора эпидермального фактора роста (РЭФР). Присоединение лиганда к РЭФР вызывает его внутриклеточную тирозин-киназную активность, что, в свою очередь, запускает сигнальный каскад, активирующий синтез ДНК и пролиферацию клеток. Изучение данного рецептора представляет собой важность для биологии и медицины в связи с тем, что его повышенная активность и экспрессия ассоциирована с некоторыми видами рака, такими как рак легких

и глиобластома (опухоль мозга). Известно, что мутации в рецепторе были обнаружены при некоторых формах рака, а сам рецептор является мишенью для антираковой терапии [23]. Авторы статьи [22] показали, что активация РЭФР остается на локальном уровне в нормальных (неоверэкспрессированных) клетках, в то время, как при оверэкспрессии рецептор фосфорилируется по всей клетке.

Стоит отметить, что микрофлюидные технологии в комбинации с методами оптической микроскопии применяются также для моделирования различных внутренних систем организма. Так, широкое распространение получили МФУ, позволяющие имитировать микрокапилляры сердечно-сосудистой системы и изучать механические воздействия на клетки эндотелия сосудов [24]. Эти исследования обладают большой прикладной и фундаментальной значимостью в связи с тем, что хорошо известна зависимость между механическими свойствами стенки сосудов и такими распространенными болезнями, как атеросклероз и гипертония. Помимо этого, существуют МФУ, имитирующие физиологические и патофизиологические механические процессы в дыхательных путях [25]. Примеры подобного применения МФУ и устройства, совмещаемого с первой группой методов регистрации/детектирования, приведены в статье [26], в которой авторы использовали комбинацию флуоресцентной микроскопии и МФЧ, моделирующего систему капилляров для изучения перемещений раковых клеток до и после обработки химиотерапевтическими агентами. С помощью флуоресцентной микроскопии осуществлялось выявление погибших клеток.

К первой группе можно отнести систему, представленную в статье [27] и предназначенную для измерения внутриклеточных и внеклеточных белков отдельных клеток. Авторы статьи использовали МФУ представляющее сеть параллельных микроканалов, по которым был организован ток бактерий *E.coli* с флуоресцентно мечеными белками, а определение количества белков в каждой отдельной бактерии происходило при регистрации сигнала флуоресценции методом флуоресцентной микроскопии.

В статье [28] есть еще один пример использования МФУ в сочетании с флуоресцентными методами. Авторы разработали специальный автоматический деформационный цитометр, который измеряет в динамическом режиме механическую деформацию для  $10^3$ – $10^4$  красных кровяных телец (ККТ) в популяции. Одновременно выполняются флуоресцентные измерения ККТ. Благодаря этому, становится возможным отслеживать корреляцию между биохимическими свойствами и механической деформацией.

В другой статье [29] авторы отмечают, что исследование клеточных процессов и генных регуляторных сетей внутри живых клеток требует улучшения технологии динамического клеточного отображения. В качестве решения они предлагают микрофлюидную систему, которая обладает механическим захватом (улавливающие камеры) для клеток в непрерывном потоке, а также способностью переключения потока во время покадровой флуоресцентной регистрации с высоким увеличением. Функциональность системы была подтверждена путем наблюдения за реакцией феромон-индуцированной экспрессии GFP в клетках *Saccharomyces cerevisiae*.

Пример использования флуоресцентной микроскопии в качестве метода регистрации, приведен в статье [30], где представлена методика для измерения при помощи флуоресцентных микрочастиц (шариков) кинетики связывания антиген (антитело для антител), выделяемых из отдельной клетки.

Известно, что прогрессирование некоторых инфекционных заболеваний может быть связано с подавлением или усилением апоптоза (программируемая клеточная смерть). Гибель лимфоцитов путем апоптоза находится в положительной корреляции с быстрой прогрессией СПИДа. Кроме того, апоптоз является преобладающей формой гибели клеток миокарда в ранний период развития инфаркта. На основе экспериментальных данных было выявлено, что программируемая гибель кардиомиоцитов также может быть обусловлена гипоксией, ишемией, перегрузкой клетки кальцием, воспалением и токсинами [31].

В области изучения апоптоза за прошедшие несколько лет стали успешно применяться микрофлюидные технологии, с помощью которых стало возможно иммобилизовать клетки, не влияя на их жизнеспособность и детально контролировать условия эксперимента.

Особого внимания заслуживает статья, в которой был предложен метод, позволяющий обеспечить постоянное и одновременное наблюдение различных апоптотических событий в одиночных клетках в режиме реального времени [32]. Авторы предложили простой и эффективный метод визуализации процессов апоптоза при помощи комбинации КЛСМ и МФУ.

Пример совмещения МФУ с динамической микроскопией фазового контраста (ДМФК), приведен в статье [33]. Так, ДМФК позволяет осуществлять детектирование в реальном времени с учетом дифракционного предела наблюдения динамических процессов в микроскопическом масштабе. В случае микробиологических приложений данный подход является хорошо применимым из-за присущей ему фазовой чувствительности, низкого светового фона, отсутствия флуоресцентных красителей и способности регистрировать движение, что является преимуществом по сравнению с традиционной оптической микроскопией. Кроме того, комбинация ДМФК с МФУ выгодна по трем причинам: трассирующие частицы выделяются, в то время как статический фон подавляется, что дает оптимальные изображения для последующей оценки поля скорости потока; если постоянная времени системы выбрана соответствующим образом, наблюдаются траектории формирования и движения частиц, что позволяет наблюдать непосредственно поле скоростей потока; микропроцессы перемешивания можно наблюдать без трассирующих частиц.

К МФУ второй группы, можно отнести устройство, представленное в статье [34]. Авторы приводят пример разработанной ими микрофлюидной ячейки совместимой с АСМ и силовой спектроскопией. Ячейка была собрана из трех изготовленных из ПДМС частей и зонда. Зонд для АСМ был встроен так, что его консоль и наконечник выступают в микрофлюидном канале. Данное устройство предназначено для применения при высоких скоростях сдвига и условия ламинарности потока в водных средах.

В статье [35] также приводится пример МФУ второй группы. Речь идет о специальной жидкостной ячейке, которая в сочетании с кантилевером для АСМ, является *patch-clamp* системой. Используя данный подход, авторы составили карту токов, проявляющихся непосредственно при стимулировании клеток кератиноцитов человека (HaCaT) при помощи кантилевера.

Пример использования комбинации микрофлюидики и АСМ для изучения влияния химиотерапии на механические параметры клеток, представлен в статье [26]. Авторы анализировали эффективность действия антираковой химиотерапии широко используемыми препаратами (даунорубин и дексаметазон) на клетки лимфобластной и миелоидной лейкемии человека, выделенные из проб нескольких пациентов. Для иммобилизации одиночных клеток использовалось многоканальное МФУ, а регистрация изменения механических параметров клетки осуществлялась через определение давления, оказываемого кантилевером на нее.

Пример МФУ, которое используется в комбинации с электрическим и оптическим методом регистрации, то есть относится к первой и третьей группе, приводится в статье [36]. МФУ предназначено для изучения механических и электрических свойств клеток при прохождении пробы через канал специальной формы. Электроды погружались во входной и выходной резервуар МФУ. В экспериментах выполнялась регистрация профиля импеданса и происходила запись изображений движения клетки через канал. Исходя из полученных данных, авторы определяли: время прохождения клетки через канал, амплитуду импеданса за этот период и величину удлинения клетки.

Таким образом, создание современных средств исследования биологических объектов путем совмещения МФУ с приборами микроскопии (оптической, КЛСМ, АСМ и пр.) является актуальной задачей на сегодняшний день.

## Моделирование процесса гидродинамического разделения частиц

Моделирование гидродинамического разделения частиц в потоке (рис. 1) проводилось для топологии рабочей зоны МФЧ, представляющей собой подводящий канал шириной 100 мкм, реакционную камеру шириной 630 мкм и зауженный канал шириной 12 мкм, который соединяет подводящий канал с реакционной камерой. Разделение рассматривалось на примере микрочастиц размером 3 и 10 мкм (схожи по размерам с биологическими объектами) с плотностью  $\rho = 1510 \text{ кг/м}^3$  и для двух начальных положений в подводящем канале (центр симметрии, смещение от центра симметрии на 25 мкм вверх). Расход жидкости  $Q = 1 \text{ мкл/мин}$ . Для моделирования движения частиц применялся пакет программ COMSOL Multiphysics, решающий системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. При моделировании рассматривалась двумерная, плоская задача. Поток жидкости описывался при помощи уравнений Навье – Стокса.

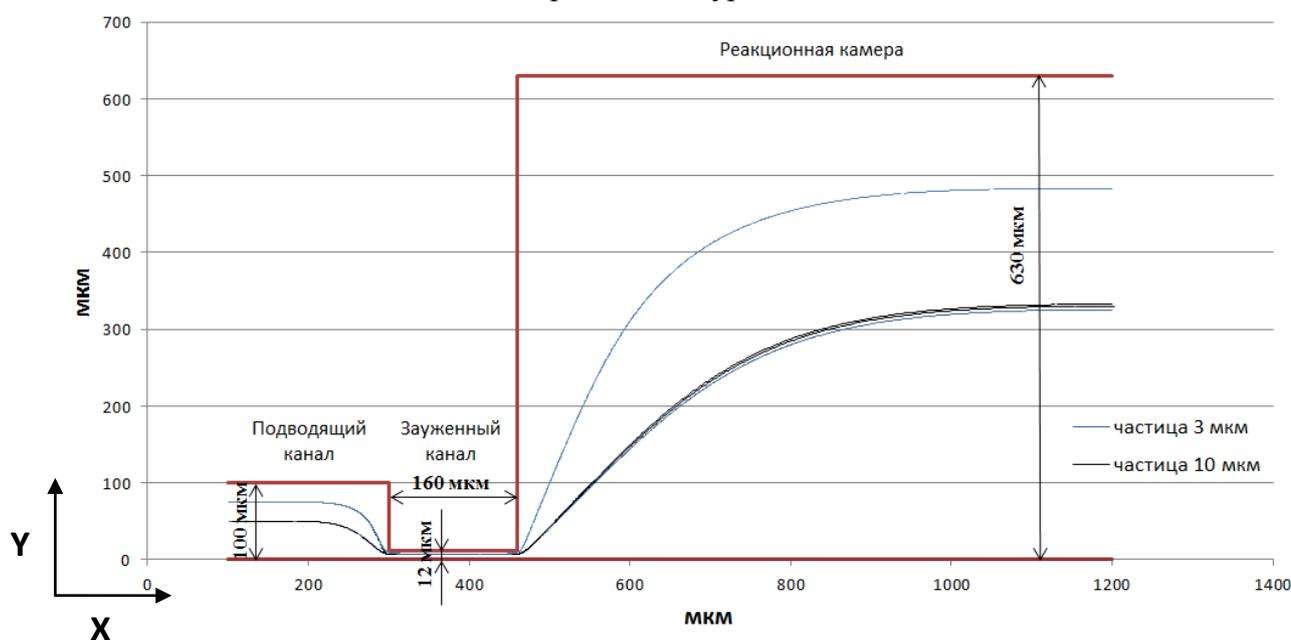


Рис. 1. Схематическое изображение топологии рабочей зоны МФЧ и траектории частиц 3 и 10 мкм, полученные при моделировании

Из результатов моделирования, представленных на рис. 1 следует, что траектории микрочастиц с размером 10 мкм при различных начальных положениях в подводящем канале (центр симметрии, смещение на 25 мкм вверх относительно центра симметрии) практически совпадают. Частицы размером 3 мкм, расположенные на оси симметрии подводящего канала, движутся ниже частиц размером 10 мкм на 5 мкм (значение измерено на расстоянии 1200 мкм по оси X). При смещении их на 25 мкм вверх относительно центра симметрии подводящего канала частицы размером в 3 мкм движутся выше частиц в 10 мкм на 150 мкм (значение на расстоянии 1200 мкм по оси X).

Таким образом, полученные в ходе моделирования результаты подтверждают возможность гидродинамического разделения микрочастиц размерами 3 и 10 мкм с плотностью  $\rho = 1510 \text{ кг/м}^3$  и при  $Q = 1 \text{ мкл/мин}$  в предложенной топологии рабочей зоны, то есть подтверждена возможность дискриминации частиц по их механическим величинам (геометрическим размерам).

## Изготовление микрофлюидных чипов из полидиметилсилоксана

На основании результатов моделирования была предложена топология МФЧ для гидродинамического разделения частиц (рис. 2). В соответствии с данной топологией были изготовлены шаблоны из стекла марки Крон 8 (К8) методом лазерной литографии с кислотным травлением. Процесс изготовления шаблона МФЧ содержал следующие операции:

- на подложку из стекла К8 наносилась тонкая пленка хрома толщиной порядка 100 нм, поверх ее – слой фоторезиста толщиной в несколько мкм, далее выполнялось засвечивание лазерным излучением в соответствии с заданной топологией;
- образец погружался в проявитель для удаления неэкспонированного фоторезиста;
- образец погружался в специальный раствор с целью удаления хрома незакрытого фоторезистом;
- образец погружался в раствор на основе HF с целью травления стекла К8 в соответствии с полученной топологией;
- образец погружался в ацетон с целью снятия фоторезиста;
- заготовку обрабатывали раствором для снятия хрома с целью удаления его остатков с образца;
- на образец наносили слой хрома. Добавление последней операции обусловлено тем, что ПДМС обладает хорошей адгезией к стеклу, что может осложнить отделение полученных МФЧ из ПДМС от шаблона.

В промежутках между операциями химической обработки осуществлялась промывка образца в воде. Изображение готового шаблона представлено на рис. 3а.

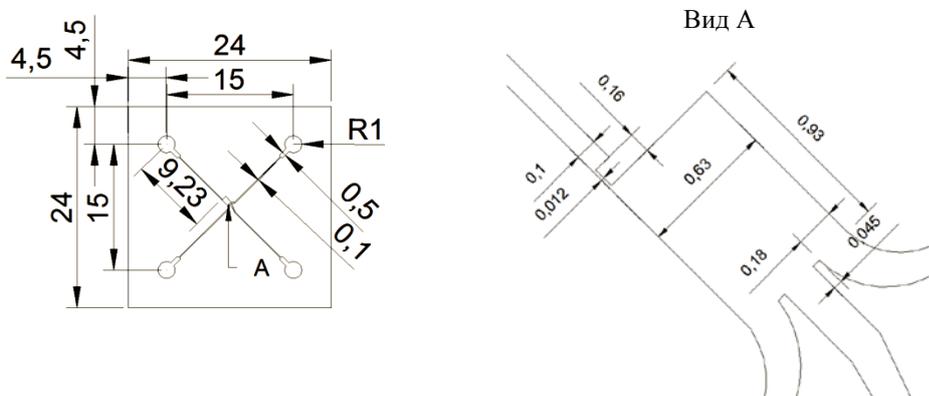


Рис. 2. Топология МФЧ для гидродинамического разделения частиц в потоке (размеры в миллиметрах)

Для полученных шаблонов выполнялся контроль наиболее функционально значимых геометрических характеристик (за исключением глубины), который осуществлялся на инвертированном оптическом микроскопе *Axio Observer D1m* (Carl Zeiss, Германия). Изображение центральной области шаблона МФЧ для гидродинамического разделения частиц в потоке с условными обозначениями подконтрольных геометрических размеров представлено на рис. 3б. Оценка высоты полученных функциональных элементов проводилась на профилометре XP-1 (Ambios Technology, США). Было выполнено не менее пяти измерений каждого размера. Оценки геометрических характеристик, математического ожидания  $M$ , среднего квадратического отклонения  $\sigma$  и полуширины доверительного интервала  $t\sigma$  сведены в Табл. 1. Полуширина доверительного интервала рассчитывалась для доверительной вероятности 0,95 с учетом коэффициентов Стьюдента



Рис. 3. Изображения: а – шаблон для изготовления МФЧ для гидродинамического разделения частиц в потоке из ПДМС; б – центральная его область (L1–L4 – условные обозначения подконтрольных геометрических размеров)

Таблица 1

Оценки геометрических характеристик топологии шаблона для изготовления МФЧ из ПДМС для гидродинамического разделения частиц в потоке

Размер	Единица измерения	Обозначение на рис. 3б	Минимальное значение	Максимальное значение	$M$	$\sigma$	$t\sigma$
Ширина подводящего канала	мкм	L1	100,7	101,5	100,90	0,28	0,72
Ширина канала между подводящим каналом и реакционной камерой	мкм	L2	11,2	11,9	11,57	0,33	0,85
Длина канала между подводящим каналом и реакционной камерой	мкм	L3	160,1	162,0	161,18	0,80	2,06
Ширина реакционной камеры	мкм	L4	629,3	635,5	632,37	3,09	7,94
Высота структур	мкм	-	15,8	17,2	16,52	0,57	1,47

Из данных Табл. 1 следует, что минимальное и максимальное значения, полученные для каждой из характеристик, не превышают критерия в  $\pm t\sigma$ . Математическое ожидание для оценок наиболее значимых геометрических размеров шаблона МФЧ не отличается более чем на  $\sim 1,2$  мкм ( $\sim 3,6\%$ ) от линейных размеров, выбранных при разработке топологии МФЧ, представленной на рис. 2.

Процесс изготовления МФЧ для гидродинамического разделения частиц в потоке из ПДМС состоял из следующих операций:

- шаблон помещался в пластиковую чашку Петри и продувался сжатым потоком из ПДМС;
- основа смешивалась с отвердителем (в данном случае 10:1, так как использовался ПДСМ Silgard 184 (DowCorning, США)) и полученная смесь наносилась на шаблон;
- чашка Петри, в которую помещен шаблон с нанесенным на него ПДМС, ставилась в вакуумную камеру на 30 мин. с целью дегазации ПДМС;
- чашка Петри помещалась на 4 ч в термостат, нагретый до температуры в  $65^\circ\text{C}$  для отверждения ПДМС;
- полученную заготовку МФЧ из ПДМС отделяли от шаблона, обрезали до заданного размера, при помощи пробойника проделывали отверстия под загрузочные/сливные резервуары.

Для изготовленных МФЧ, так же как и для шаблона, осуществлялся контроль наиболее важных геометрических размеров (за исключением глубины структур) при помощи инвертированного оптического микроскопа Axio Observer D1m. Проводилось не менее пяти измерений каждого размера. Глубина структуры методом профилометрии не измерялась, так как ПДМС является эластичным материалом, а данный метод оказывает воздействие на поверхность. Оценки геометрических характеристик, математического ожидания  $M$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma$  для данных характеристик, представлены в Табл. 2.

Из оценок наиболее значимых геометрических размеров МФЧ из ПДМС (Табл. 2) следует, что минимальное и максимальное значения, полученные для каждой характеристики, не превышают критерия в  $\pm t\sigma$ . Математическое ожидание для оценок данных размеров МФЧ не отличается более чем на  $\sim 3,3$  мкм ( $\sim 2,75\%$ ) от линейных размеров, выбранных при разработке топологии МФЧ (рис. 2).

Таблица 2

Оценки характеристик МФЧ для гидродинамического разделения частиц в потоке

Размер	Единица измерения	Обозначение на рис. 3б	Минимальное значение	Максимальное значение	$M$	$\sigma$	$t\sigma$
Ширина подводящего канала	мкм	L1	95,5	104,2	101,12	2,20	5,65
Ширина канала между подводящим каналом и реакционной камерой	мкм	L2	11,4	12,1	11,67	0,30	0,77
Длина канала между подводящим каналом и реакционной камерой	мкм	L3	160,9	163,9	163,1	1,02	2,62
Ширина реакционной камеры	мкм	L4	627,5	640,6	633,34	4,93	12,67

С целью определения влияния точности изготовления структур шаблона на размеры структур, получаемых МФЧ из ПДМС, были построены графики разброса значений геометрических размеров шаблона и МФЧ, которые представлены на рис 4.

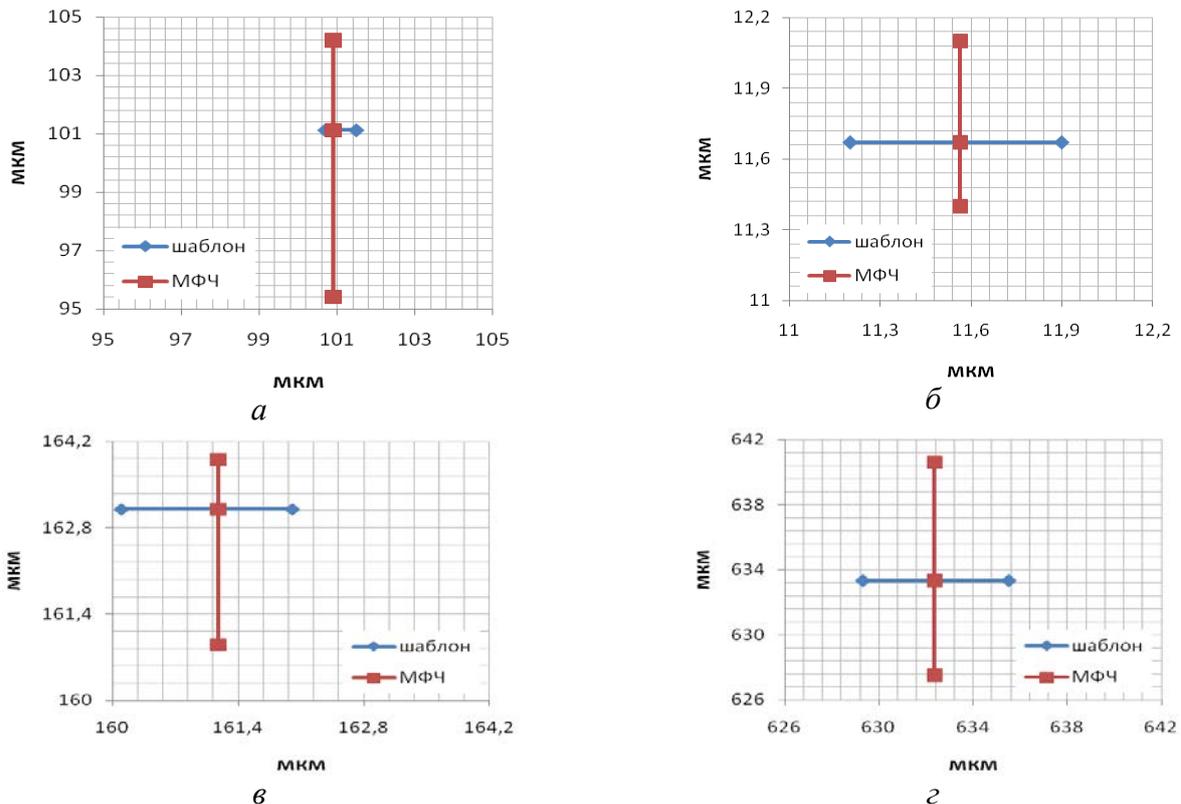


Рис. 4. Сравнение разброса значений геометрических размеров для шаблона и МФЧ из ПДМС: а – соответствует L1; б – L2; в – L3; г – L4

Из представленных на рис. 4 графиков видно, что в большинстве случаев разброс значений геометрических размеров МФЧ из ПДМС существенно больше, чем разброс значений тех же размеров, но для шаблона. Это свидетельствует о том, что точность изготовления структур МФЧ из ПДМС, по большей части, определяется точностью исполнения структур шаблона, который используется при его изготовлении.

Итак, для изготовления МФЧ из ПДМС сначала необходимо изготовить шаблон. В данном случае они изготавливались методом лазерной литографии с последующим кислотным травлением. Контроль наиболее значимых геометрических характеристик шаблонов МФЧ показал, что полученные значения оценок отличаются не более чем на ~ 3,6 %

от значений размеров, выбранных при разработке топологии МФЧ для гидродинамического разделения частиц (рис. 2). МФЧ из ПДМС были изготовлены путем отливки по шаблону. Контроль геометрических характеристик МФЧ из ПДМС не выявил существенных отличий (отклонение не более чем на  $\sim 2,75\%$ ) значений полученных оценок от значений размеров, выбранных при разработке топологии МФЧ. Показано, что точность изготовления структур МФЧ из ПДМС, по большей части определяется структурами шаблона, который используется при его изготовлении, что как раз и подтверждается полученными оценками.

### Герметизация микрофлюидных чипов

Герметизация МФЧ осуществлялась за счет хорошей адгезии ПДМС к стеклу, которая в случае плотного контакта двух материалов (отсутствие воздуха) обеспечивает достаточную силу связи между ними, что позволяет проводить операции с жидкостью в замкнутом объеме. Так, для герметизации изготовленных из ПДМС МФЧ использовались предметные стекла, обрезанные по контуру с запасом 1 мм. МФЧ из ПДМС наносился на полученную стеклянную подложку, а затем проводилось вакуумирование.

### Гидравлический интерфейс для микрофлюидных чипов

Чтобы обеспечить позиционирование МФЧ для гидродинамического разделения частиц на предметном столике конфокального лазерного сканирующего микроскопа TCS SL (*Leica*, Германия) и загрузки/слива проб и буферных растворов при помощи внешнего насоса, был разработан и изготовлен специальный гидравлический интерфейс. Интерфейс и принцип размещения в нем МФЧ представлен на рис. 5. МФЧ, нанесенный на обрезанную по контуру стеклянную подложку, размещается над прорезью в основании. После этого на герметичный МФЧ накладывается гидравлический интерфейс так, чтобы его выходы совпадали с загрузочными/сливными резервуарами МФЧ, и полученная конструкция стягивается при помощи винтов.

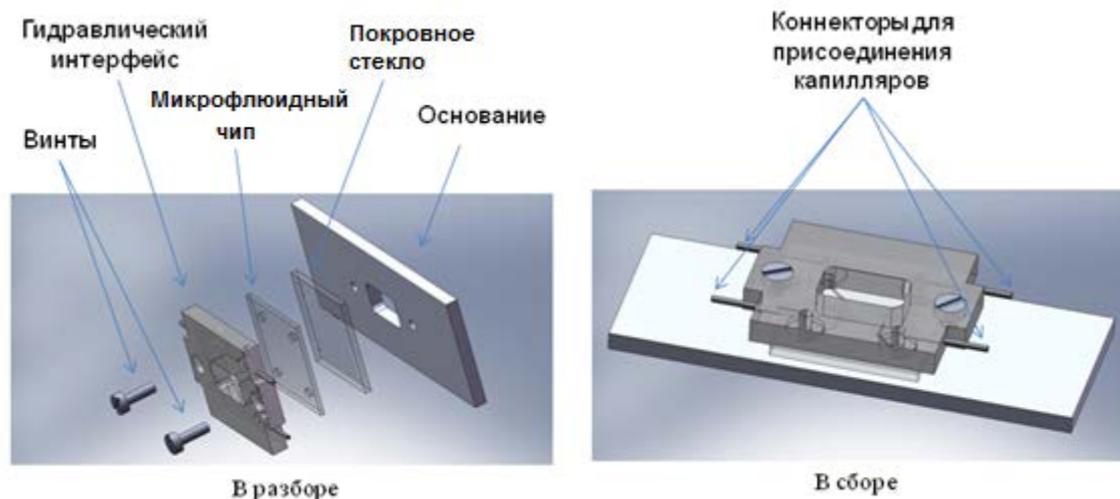


Рис. 5. Гидравлический интерфейс МФЧ для гидродинамического разделения частиц

### Экспериментальная установка для испытания микрофлюидных чипов

С целью проведения испытаний МФЧ на базе конфокального лазерного сканирующего микроскопа TCS SL (*Leica*, Германия) была собрана и настроена экспериментальная установка для проверки его функционирования. Для создания потоков жидкости в МФУ использовался шприцевой насос 70-2209 (*Harvard apparatus*, США), который при помощи капилляров подключался к гидравлическому интерфейсу. Для возбуждения флуоресценции использовалась ультрафиолетовая лампа, а для ее регистрации цифровая камера, встроенная в оптическую схему микроскопа и подключенная к компьютеру. Общий вид данной системы приведен на рис. 6.

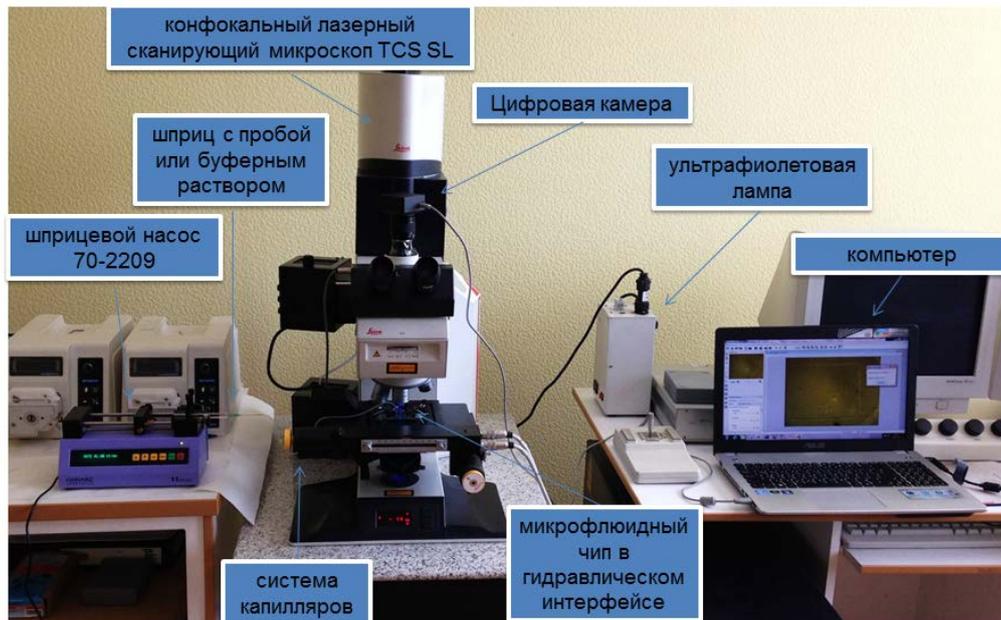


Рис. 6. Экспериментальная установка для испытания МФЧ на базе конфокального лазерного сканирующего микроскопа TCS SL

### Экспериментальные исследования разделения микрочастиц в микрофлюидных чипах

Для подтверждения возможности гидродинамического разделения частиц в потоке были проведены испытания МФЧ из ПДМС. В ходе испытаний применялись флуоресцентно-меченные полимерные микрочастицы размером 3 и 10 мкм, а расход пробы составил  $Q = 1$  мкм/мин. Экспериментальные данные в сравнении с результатами моделирования приводятся на рис. 7.

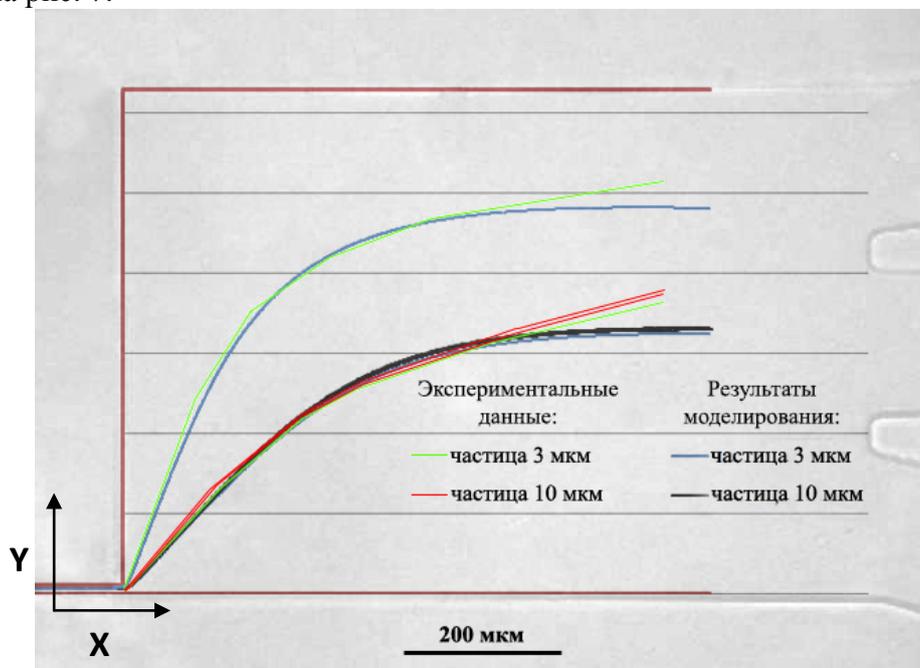


Рис. 7. Траектории частиц в 3 и 10 мкм в реакционной камере МФЧ для гидродинамического разделения частиц

Полученные экспериментальные данные (рис. 7) подтвердили наличие зависимости траектории движения микрочастиц размером 3 и 10 мкм в реакционной камере МФЧ от их положения относительно оси симметрии подводящего канала. Кроме того, видно, что полученные экспериментальные данные достаточно хорошо совпадают с результатами моделирования.

моделирования траекторий микрочастиц при  $Q = 1$  мкм/мин (рис. 1) до пересечения ими середины реакционной камеры по оси  $X$ . Данное обстоятельство, скорее всего, обусловлено снижением гидравлического сопротивления в реакционной камере изготовленного МФЧ в сравнении с расчетным, что является следствием погрешности его изготовления. Однако значения величины разделения частиц по оси  $Y$ , полученные в ходе экспериментов, совпадают со значениями, полученными при моделировании. Они составляют:

– 5 мкм при начальном положении частиц в подводящем канале в вдоль оси симметрии, причем частицы размером 3 мкм движутся ниже 10 мкм частиц;

– 150 мкм при начальном смещении частиц на 25 мкм вверх относительно оси симметрии подводящего канала, причем частицы размером 3 мкм движутся выше 10 мкм частиц. Также был подтвержден факт того, что траектории 10 мкм частиц будут практически одинаковыми при различных начальных положениях в подводящем канале.

Итак, на основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что предложенная и рассмотренная при моделировании топология рабочей зоны МФЧ (рис. 1), а также разработанная на ее основе топология МФЧ (рис. 2), которая изготавливалась из ПДМС, пригодна для дискриминации частиц по их механическим величинам (геометрические размеры).

### Заключение

В рамках исследования биологических объектов методами микроскопии высокого разрешения с помощью МФУ было сделано следующее:

- проведен анализ литературных источников, в результате которого выявлены современные тенденции развития МФУ, выполнена их классификация по методам регистрации/детектирования объектов исследования, применяемым в совокупности с МФУ, и рассмотрен ряд работ, ее подтверждающих;

- проведено моделирование траекторий частиц размерами в 3 и 10 мкм в предложенной топологии рабочей зоны МФЧ, которое показало возможность дискриминации частиц по их механическим величинам (геометрические размеры);

- на основе результатов моделирования была предложена топология МФЧ для гидродинамического разделения частиц в потоке;

- методом лазерной литографии с последующим кислотным травлением были изготовлены шаблоны МФЧ для гидродинамического разделения частиц и проведен контроль функционально значимых геометрических размеров шаблонов, который показал, что отклонение их размеров не превышает  $\sim 3,6\%$ ;

- способом отливки ПДМС по шаблону были изготовлены МФЧ для гидродинамического разделения частиц и проведен контроль функционально значимых геометрических размеров чипов, который показал, что отклонение их размеров не превышает  $2,75\%$ ;

- проведена герметизация МФЧ за счет хорошей адгезии ПДМС к стеклу;

- разработан и изготовлен гидравлический интерфейс для загрузки/слива буферных растворов/проб в МФЧ, который также позволяет позиционировать чип на предметном столике конфокального лазерного сканирующего микроскопа;

- собрана и настроена экспериментальная установка на базе конфокального лазерного сканирующего микроскопа для проведения испытания МФЧ, предназначенного для гидродинамического разделения частиц;

- проведены экспериментальные испытания МФЧ из ПДМС, которые подтвердили, что предложенная и рассмотренная при моделировании топология рабочей зоны МФЧ и разработанная на ее основе топология МФЧ для гидродинамического разделения частиц, пригодны для их дискриминации по механическим величинам.

В заключение стоит отметить, что полученные в ходе проделанной работы экспериментальные данные, разработанные устройства и собранная на базе конфокального лазерного сканирующего микроскопа экспериментальная установка для испытания МФЧ, предназначенного для гидродинамического разделения частиц, могут использоваться как

основа для создания современных диагностических и исследовательских систем/платформ в биологии, фармакологии и медицине.

### Публикации

1. Кухтевич И.В. Исследование и разработка микрофлюидных устройств для анализа биологических объектов методами микроскопии высокого разрешения: Автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2013. – 20 с.

### Литература

1. Manz A., Graber N., Widmer H.M. Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 1990. Vol. 1. P. 244–248.
2. Kersaudy-Kerhoas M., Dhariwal R., Desmulliez M.P.Y. Recent advances in microparticle continuous separation // *IET Nanobiotechnol.* 2008. Vol. 2. No 1. P. 1–13.
3. Yamada M., Nakashima M., Seki M. Pinched flow fractionation: continuous size separation of particles utilizing a laminar flow profile in a pinched microchannel // *Analytical Chemistry*. 2004. Vol. 76. No 18. P. 5465–5471.
4. Morijiri T., Sunahiro S., Senaha M. et al. Sedimentation pinched-flow fractionation for size- and density-based particle sorting in microchannels // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2011. Vol. 11. P. 105–110.
5. Guo F., French J.B., Li P. et al. Probing cell–cell communication with microfluidic devices // *Lab on a chip*. 2013. Vol. 13. No 16. P. 3152–3162.
6. Yetisen A.K., Akram M.S., Lowe C.R. Paper-based microfluidic point-of-care diagnostic devices // *Lab on a chip*. 2013. Vol. 13. No 12. P. 2210–2251.
7. Primiceri E., Chiriaco M.S., Rinaldi R., Maruccio G. Cell chips as new tools for cell biology – results, perspectives and opportunities // *Lab on a chip*. 2013. Vol. 13. No 19. P. 3789–3802.
8. Li S.-J., Li J., Wang K. et al. A nanochannel array-based electrochemical device for quantitative label-free DNA analysis // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4. No 11. P. 6417–6424.
9. Rivet C., Lee H., Hirsch A. et al. Microfluidics for medical diagnostics and biosensors // *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66. P. 1490–1507.
10. Mielnik M.M., Saetran L.R. Micro particle image velocimetry – an overview // *Turbulence*. 2004. Vol. 10. P. 83–90.
11. Gossett D.R., Tsea H.T.K., Lee S.A. et al. Hydrodynamic stretching of single cells for large population mechanical phenotyping // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. Vol. 109. No 20. P. 7630–7635.
12. Goda K., Ayazi A., Gossett D.R. et al. High-throughput single-microparticle imaging flow analyzer // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. Vol. 109. No 29. P. 11630–11635.
13. Rosenbluth M.J., Lam W.A., Fletche D.A. Analyzing cell mechanics in hematologic diseases with microfluidic biophysical flow cytometry // *Lab on a chip*. 2008. Vol. 8. No 7. P. 1062–1070.
14. Sraj I., Eggleton C.D., Jimenez R. Cell deformation cytometry using diode-bar optical stretchers // *Journal of Biomedical Optics*. Vol. 15. No 4. P. 047010-1–047010-7.
15. Andersson H., Baechli T., Hoehel M., Richter C. Autofluorescence of living cells // *Journal of Microscopy*. 1998. Vol. 191. P. 1–7.
16. DaCosta R., Wilson B., Marcon N. New optical technologies for earlier endoscopic diagnosis of premalignant gastrointestinal lesions // *Journal of Gastroenterology and Hepatology*. 2002. Vol. 17. P. 85–104.
17. Emmelkamp J., Wolbers F., Andersson H. et al. The potential of autofluorescence for the detection of single living cells for label-free cell sorting in microfluidic systems // *Electrophoresis*. 2004. Vol. 25. P. 3740–3745.
18. Takehara H., Nagaoka A., Noguchi J. et al. Microfluidic interface devices for in vivo analysis of neural cells using 2-photon laser scanning microscopy // *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (3–7 October 2010, Groningen, The Netherlands)*. Vol. 3. Groningen, 2010. P. 2111–2113.

19. Zeng F., Rohde C.B., Yanik M.F. Sub-cellular precision on-chip small-animal immobilization, multi-photon imaging and femtosecond-laser manipulation // *Lab on a chip*. 2008. Vol. 8. P. 653–656.
20. Breslauer D.N., Lee P.J., Lee L.P. Microfluidics-based systems biology // *Molecular Biosystems*. 2006. Vol. 2. No 2. P. 97–112.
21. Takayama S., Ostuni E., LeDuc P. et al. Selective chemical treatment of cellular microdomains using multiple laminar streams // *Chemistry & Biology*. 2003. Vol. 10. P. 123–130.
22. Sawano A., Takayama S., Matsuda M., Miyawaki A. Lateral propagation of EGF signaling after local stimulation is dependent on receptor density // *Developmental Cell*. 2002. Vol. 3. P. 245–257.
23. Zhang H., Berezov A., Wang Q. et al. ErbB receptors: From oncogenes to targeted cancer therapies // *Journal of Clinical Investigation*. 2007. Vol. 117. No 8. P. 2051–2058.
24. Song J.W., Gu W., Futai N. et al. Computer-controlled microcirculatory support system for endothelial cell culture and shearing // *Analytical Chemistry*. 2005. Vol. 77. No 13. P. 3993–3999.
25. Huh D., Fujioka H., Tung Y.C. et al. Acoustically detectable cellular-level lung injury induced by fluid mechanical stresses in microfluidic airway systems // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 2007. Vol. 104. P. 18886–18891.
26. Lam W.A., Rosenbluth M.J., Fletcher D.A. Chemotherapy exposure increases leukemia cell stiffness // *Blood*. 2007. Vol. 109. No 8. P. 3505–3508.
27. Taniguchi Y., Choi P.J., Li G.W. et al. Quantifying *E. coli* proteome and transcriptome with single-molecule sensitivity in single cells // *Science*. 2010. Vol. 329. P. 533–538.
28. Bow H., Pivkin I.V., Diez-Silva M. et al. A microfabricated deformability-based flow cytometer with application to malaria // *Lab on a chip*. 2011. Vol. 11. No 6. P. 1065–1073.
29. Lee P.J., Helman N.C., Lim W.A., Hung P.J. A microfluidic system for dynamic yeast cell imaging // *BioTechniques*. 2008. Vol. 44. No 1. P. 91–95.
30. Singhal A., Haynes C.A., Hansen C.L. Microfluidic measurement of antibody-antigen binding kinetics from low-abundance samples and single cells // *Analytical Chemistry*. 2010. Vol. 82. No 20. P. 8671–8679.
31. Ярилин А.А. Апоптоз и его роль в целостном организме // *Глаукома*. 2003. № 2. С. 46–54.
32. Munoz-Pinedo C., Green D.R., van den Berg A. Confocal restricted-height imaging of suspension cells (CRISC) in a PDMS microdevice during apoptosis // *Lab on a chip*. 2005. Vol. 5. P. 628–633.
33. Denz C., Holtmann F., Woerdemann M., Oevermann M. Nonlinear dynamic phase contrast microscopy for microfluidic and microbiological applications // *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*. 2008. Vol. 7038. P. 70380X-1–70380X-9.
34. Schoenwald K., Peng Z.C., Noga D. et al. Integration of atomic force microscopy and a microfluidic liquid cell for aqueous imaging and force spectroscopy // *Review of Scientific Instruments*. 2010. Vol. 81. No 5. – 5 p.
35. Upadhye K.V., Candiello J.E., Davidson L.A., Lin H. Whole-cell electrical activity under direct mechanical stimulus by AFM cantilever using planar patch clamp chip approach // *Cellular and molecular bioengineering*. 2011. Vol. 4. No 2. P. 270–280.
36. Chen J., Zheng Y., Tan Q. et al. Classification of cell types using mechanical and electrical measurement on single cells // *Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (October 2–6, 2011, Seattle, Washington, USA)*. P. 795–797.
37. Чарыков А.К. Математическая обработка результатов химического анализа. Л., 1984. –168 с.



**Лабковская Римма Яновна**  
**Факультет компьютерных технологий и управления**  
**Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем**  
**E-mail: studsovet\_itmo@mail.ru**

## **СТАТИКА И ДИНАМИКА МЕМБРАННЫХ И ПЛАСТИНЧАТЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Р.Я. Лабковская

Научный руководитель – профессор В.Л. Ткалич

### **Введение**

Рост требований к датчикам, микросенсорам и коммутационным элементам [1] и, в первую очередь, к их метрологическим характеристикам и показателям надежности, делает актуальной проблему повышения качества электромеханических элементов (ЭМЭ). Снижение материалоемкости конструкции, обеспечение заданного ресурса работы, параметров надежности и точности являются важнейшими требованиями для вновь разрабатываемых элементов систем управления. Эти требования обусловили развитие расчетных и экспериментальных методов и средств прикладной механики и существенно изменили к настоящему времени общую методологию проектирования новых типов датчиков и коммутационных устройств [2, 3].

На сегодняшний день не существует ни одного универсального инженерного метода, обладающего бесспорными преимуществами при решении проблем статики и динамики ЭМЭ. Поэтому следует обратить внимание на альтернативные варианты «гибридизации» различных численных методов в одном алгоритме с целью использования их преимуществ и компенсации слабых сторон.

Несмотря на значительное количество теоретических моделей и методов расчета тонкостенных структур, по-прежнему остается нерешенной проблема аналитического описания ЭМЭ как объектов, геометрические образы которых имеют вполне конкретные объемы, ограниченные алгебраическими поверхностями соответствующих порядков. Актуальными остаются проблема анализа ЭМЭ с учетом реальной (во многих случаях переменной) толщины стенок, а также задача исследования нелинейных колебаний, полей деформаций и напряжений в данных объектах [4].

### **Цели и задачи проекта**

Целями проекта являются разработка методологии расчета статики и динамики электромеханических элементов (ЭМЭ), а также построение математических моделей (ММ) управления их качеством. Для их достижения необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ и классификацию традиционных и новых типов плоских ЭМЭ в измерительных приборах и коммутационных устройствах систем управления;
- разработать новые машинно-ориентированные методы и алгоритмы расчета статики и динамики ЭМЭ;
- провести анализ устойчивости ЭМЭ;
- разработать алгоритмы нахождения собственных значений (форм и частот) ММ ЭМЭ и провести экспериментальную проверку их адекватности;
- разработать алгоритм расчета присоединенных масс и моментов инерции жидкости для различных видов ЭМЭ при движении в вязких средах;
- разработать метод повышения надежности ЭМЭ;
- разработать установку формирования регулярного микрорельефа (РМР) ЭМЭ на листовых тонкостенных образцах;
- разработать серию новых конструкций магнитоуправляемых контактов

(термобиметаллических и ртутносмачиваемых) с улучшенными показателями качества;  
– разработать неразрушающие бесконтактные методы исследования и контроля ЭМЭ.

### Методы исследования

Методы решения поставленных задач основаны на системном подходе к рассматриваемой проблеме. Они базируются на традиционных численных методах анализа тонкостенных структур (методе конечных разностей, граничных и конечных элементов); вариационном методе Хеллингера-Рейснера; а также на вновь разработанных: комбинированном многоуровневом (основанном на гипотезах Кирхгофа-Лява и моделей Тимошенко); методе анализа статики и динамики, математический аппарат которого использует Абелевы функции; и модифицированном методе Бобылева-Жуковского. При анализе динамики и собственных значений использованы преобразования Якоби, методы Релея-Ритца, Чебышева, Ланцоша. Для построения математических моделей присоединенных масс применены методы сечений, электромеханических аналогий и теории графов. При обработке экспериментальных данных по статике и динамике ЭМЭ будут применены методы математической статистики, теории вероятности и наименьших квадратов. Для оценки функции качества – методы оптимизации и унификации (градиентный, полного перебора по сетке и штрафных функций). В ходе исследования и контроля ЭМЭ будут применены методы неразрушающего контроля (оптический автоколлимационный и томографические методы). При формировании РМР рабочих поверхностей ЭМЭ можно использовать метод вибронакатывания.

В силу ряда специфических достоинств метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время является наиболее популярным методом инженерного анализа целого ряда сложных структур. Поэтому особую актуальность приобретает проблема системного анализа возможных вариантов повышения его эффективности как при сохранении строгой классической формулировки, так и при использовании его во взаимодействии с другими методами математического анализа подобных структур.

В настоящее время технические требования, предъявляемые к ЭМЭ, зачастую выходят за рамки возможностей их традиционных форм [5]. Дополнительные возможности в этом отношении создают новые типы мембран с неравномерной формой гофра (переменной глубиной, шагом и меняющимся вдоль радиуса сечением). Проектирование и исследование новых видов оболочечных ЭМЭ невозможно без разработки специального математического аппарата, алгоритмов и новых методов расчета. Экспериментальные исследования и контроль такого типа элементов также должны осуществляться новыми методами, например, томографическими.

Как статический, так и динамический нелинейный анализ ЭМЭ остаются наиболее трудоемкими и дорогостоящими этапами расчета. В то же время реальная потребность в разработке таких методов непрерывно растет.

### Основные достигнутые результаты

1. Разработан новый комбинированный многоуровневый метод (КММ) исследования многосвязных ЭМЭ, позволяющий рассчитывать сложные объекты, содержащие локальные области с физическими и геометрическими неоднородностями при различных видах однородного нагружения.

2. Получен новый алгоритм построения ММ ЭМЭ, позволяющий осуществлять адекватное аналитическое описание форм эластиков и полей напряжений в толще материала ЭМЭ.

3. Осуществлен вывод нелинейных уравнений статики и динамики ЭМЭ.

4. Предложен алгоритм определения присоединенных масс ЭМЭ и осуществлена экспериментальная проверка его адекватности.

5. Построена ММ контроля качества ЭМЭ.

6. Разработан ряд новых конструкций упругой контакт-детали магнитоуправляемого контакта.

В работе сформулированы проблемы исследования и определены перспективы развития ЭМЭ, осуществлена классификация и определены основные рабочие характеристики и требования к материалам упругих элементов.

В результате анализа отечественных и зарубежных работ по данной теме и проведенного патентно-информационного поиска, выявлены актуальные проблемы статики и динамики (аэро-, гидродинамики, механодинамики, термодинамики и термоупругости) ЭМЭ.

Классификация ЭМЭ осуществлена по основным факторам: назначению, типу, конструкции, материалам и технологии изготовления. Анализ требований, предъявляемых к материалам современных ЭМЭ, проведен с учетом большого разнообразия областей их применения, характера нагружения, условий эксплуатации и выполняемых функций. Проанализированы специфические требования к материалам упругих элементов, такие как: высокое сопротивление к микропластическим деформациям, термостойкость, устойчивость к коррозии и фреттинг-коррозии, высокая/низкая электропроводность, способность к намагничиванию, плотность дислокаций, хорошая паяемость, низкий уровень термомеханических напряжений в спае со стеклом.

Выявлено, что, с точки зрения качества ЭМЭ, его параметрическая надежность в первую очередь зависит от неупругих эффектов материала, которые проявляются в виде гистерезиса, релаксации и ползучести. Погрешности именно от этих эффектов являются причиной нестабильности показаний датчиков во времени и часто ограничивают приборную точность. Следовательно, перспективным направлением является разработка методов, позволяющих понизить степень их влияния.

В результате проведенного критического анализа установлено, что среди используемых в настоящее время численных методов решения инженерных задач ни один из них не является совершенным и не позволяет обеспечить создание «идеальных» алгоритмов расчета сложных ЭМЭ. Дальнейшую работу в направлении развития методологии расчета статики и динамики ЭМЭ целесообразно строить с учетом возможности рационального объединения в одном алгоритме различных методов численного анализа для усиления существующих у них преимуществ и компенсации слабых сторон.

Сформулирована проблема реализации КММ. В основу его положены принципы формирования суперэлементов и алгоритмического комбинирования численных методов. Реализация идеи суперэлементов оказалась достаточно плодотворной и позволила резко уменьшить объемы вводимой на конечном этапе информации; понизить порядок системы разрешающих уравнений, а следовательно, и размерности массивов коэффициентов; исключить во многих случаях необходимость обращения к внешним запоминающим устройствам или существенно уменьшить количество обращений к ним. Одним из главных преимуществ такого подхода явилось сокращение времени на подготовку исходных данных и повышение размерности решаемых задач.

Для предложенного КММ разработаны эффективные алгоритмы расчета конструкций плоских многозвенных контактов и сильфонных узлов датчиков давления.

В целом КММ обладает преимуществами каждого, входящего в него метода, и обеспечивает дополнительные преимущества в силу своей многоуровневости, а именно: увеличение вычислительных возможностей программ за счет сочетания поэтапного формирования ММ с поблочным решением уравнений; упрощение ММ сложной многозвенной структуры ЭМЭ, и, как следствие, понижение порядка итоговой системы алгебраических уравнений; возможность экономического анализа серии конструктивных вариантов структуры, поскольку любое местное изменение конструктивных элементов и даже видоизменение определенной части конструкции не требует полного переформирования всей модели, а учитывается корректировкой описания отдельных подструктур; возможность многократного использования типовых описаний, повторяющихся частей конструкции. Все отмеченное характеризует КММ как эффективный инструмент оптимизации вычислительных процедур.

Осуществлено рассмотрение теоретических основ нелинейной теории тонкостенных структур.

Сформирована библиотека конечных элементов (КЭ) тонкостенных ЭМЭ. Показано, что при использовании моментной схемы КЭ повышается точность расчетов.

Разработана методология анализа статики и устойчивости ЭМЭ. Рассмотрены общие проблемы линейного и нелинейного анализа статического деформирования тонкостенных конструкций. Проведено рассмотрение традиционных методов решения линейных и нелинейных уравнений статики тонкостенных конструкций.

Проведен анализ факторов, влияющих на статическую устойчивость тонкостенных конструкций. Предложена стратегия численного решения задач статической устойчивости сложнопрофильных многозвенных ЭМЭ.

Осуществлено рассмотрение проблемы потери устойчивости ЭМЭ при появлении несмежных форм равновесия и следящих нагрузок.

Осуществлена разработка нового метода статического анализа процессов деформирования сложнопрофильных тонкостенных ЭМЭ.

Разработана общая методология проведения экспериментов по исследованию статики ЭМЭ, выбран математический аппарат статистической обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования статики ЭМЭ подтвердили корректность расчетных данных и аналитических зависимостей, полученных в данной работе, а также позволили установить вид зависимостей технических характеристик (чувствительности, нелинейности, эффективной площади, прочности и отдельных параметров надежности) от конкретных геометрических параметров рабочего профиля (радиуса гофров, толщины оболочки и т. д.) ЭМЭ, условий его нагружения и закрепления по контуру.

Разработаны различные варианты ММ колебательных систем ЭМЭ для исследования их частотных спектров. Предложена методика расчета амплитудно-частотных характеристик многозвенных ЭМЭ при кривошипном и центробежном возбуждении их колебательных контуров с использованием метода электромеханических аналогий. Разработаны матрично-топологические модели для частотного анализа сложнопрофильных и многозвенных ЭМЭ на основе перехода к системе с сосредоточенными параметрами, с использованием методов: электромеханических аналогий, Релея-Ритца и теории графов.

Рассмотрены методы и установки для экспериментального исследования частотных спектров ЭМЭ. Разработаны, изготовлены и опробованы приспособления для крепления на столах вибростендов различных видов ЭМЭ.

Выявлены условия развития эффекта антирезонанса в колебательных системах ЭМЭ и предложен его корректный учет при проектировании новых конструкций ЭМЭ и прогнозировании их частотных характеристик.

Разработано ММ для определения присоединенных масс и присоединенных моментов инерции жидкости плоских контактных сердечников герконов и ЭМЭ акселерометров, позволяющее осуществлять надежное прогнозирование частотных характеристик ЭМЭ различных устройств автоматики. Моделирование проведено с учетом следующих факторов: вида среды, влияния твердых стенок и отрыва жидкости от поверхности ЭМЭ, ориентации их в пространстве, показателей обтекаемости формы ЭМЭ и конкретной геометрии. Исследовано влияние нелинейной составляющей жидкостного трения на частотные характеристики устройств автоматики.

Проведенный анализ динамической устойчивости упругих стержней с учетом сил внутреннего и внешнего трения показал, что при анализе динамической устойчивости ЭМЭ необходимо учитывать результат совместного действия двух сил: дестабилизирующих сил внутреннего вязкого трения в области вынужденных частот, превышающих собственную частоту ЭМЭ, и стабилизирующих сил внешнего трения. Осуществлено рассмотрение методов и устройств для исследования внутреннего трения материалов ЭМЭ. В качестве характеристики демпфирующих свойств ЭМЭ выбрано относительное рассеяние энергии, которое можно определять как при статическом, так и при динамическом нагружении.

Получены результаты теоретических и экспериментальных исследований функции качества ЭМЭ. Рассмотрены ММ управления качеством, указаны основные критерии качества и методы оптимизации. Все теоретические и экспериментальные исследования

проводились с помощью разработанного автором автоматизированного рабочего места разработчика ЭМЭ.

Разработан метод повышения надежности ЭМЭ путем регуляризации микрогеометрии их рабочих поверхностей. Проведено нормирование качества поверхности ЭМЭ.

Разработаны модели, описывающие процессы тепло- и электропроводности в ЭМЭ коммутационных устройств, что позволяет осуществлять переход к расчетному методу нормирования микрогеометрии рабочих поверхностей этих элементов.

Проведена разработка двух неразрушающих бесконтактных методов исследования и контроля ЭМЭ в напряженно-деформированном состоянии (НДС) на базе томографического и автоколлимационного методов. Они позволяют исследовать геометрические параметры ЭМЭ как непосредственно в состоянии их статического нагружения, так и после. Для каждого метода разработаны специальные приспособления, создающие сжимающие, растягивающие, изгибные и крутящие статические нагрузки.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью постановок задач и применяемых математических методов, контролем сходимости приближенных решений и аналитическим сравнением, где это возможно, с экспериментальными данными.

Разработана методика расчета статики, динамики и качества ЭМЭ систем управления, обеспечивающая: высокую степень адекватности с реальными процессами деформации в структурах упругих элементов датчиков, микросенсоров и коммутационных устройств и уменьшение трудоемкости расчетов при соблюдении высокой точности. Методика рассчитана на широкий круг специалистов и позволяет осуществлять оптимизацию проектирования и производства ЭМЭ.

### **Области возможного использования результатов проекта**

Результаты проекта могут быть использованы на практике в различных датчиках, преобразователях и коммутационных устройствах автоматики и вычислительной техники. Широкое применение они могут найти при разработке новых модификаций герконов, акселерометров и гироскопов. Предлагаемые к разработке методики расчета статики, динамики и надежности ЭМЭ систем автоматики позволят обеспечить уменьшение трудоемкости расчетов при соблюдении высокой точности, а также сокращение времени проектирования. Теоретические аспекты данной работы могут найти свою реализацию в учебном процессе высших учебных технических заведений данного профиля.

### **Заключение**

Полученные в проекте результаты представляют собой теоретическое обобщение и решение такой актуальной научной проблемы, как создание теоретической и методологической базы расчета мембранных и пластинчатых ЭМЭ как элементов современных систем автоматики и вычислительной техники.

### **Публикации**

1. Лабковская Р.Я. Исследование статики и динамики оболочечных упругих элементов систем управления // XVI Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. СПб., 2011. С. 114.
2. Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л. Анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 7. С. 32–35.
3. Лабковская Р.Я. Исследование напряженно-деформированного состояния сильфонных упругих элементов систем управления // Альманах научных работ молодых ученых НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 142–144.
4. Лабковская Р.Я. Моделирование статики и динамики элементной базы // Альманах научных работ молодых ученых НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 331–334.
5. Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Евлахова А.В., Гатчин Ю.А. Математическое моделирование статических и динамических характеристик герконовых реле для систем

защиты и сигнализации // Мат-лы международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'12. Т. 2. СПб., 2012. С. 107–111.

6. Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И. Разработка библиотеки конечных элементов для САПР упругих конструкций герконов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 3. С. 21–24.

7. Лабковская Р.Я., Лысов А.Л. Модели погрешностей чувствительных элементов навигационной системы // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2013. С. 156–158.

8. Лабковская Р.Я., Лысов А.Л., Коробейников А.Г. Разработка математической модели расчета тонкостенных упругих чувствительных элементов систем управления // Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе». Т. 1. Йошкар-Ола, 2013. С. 176–183.

9. Labkovskaya R.Ya., Pirozhnikova O.I., Lysov A.L., Gatchin Yu.A. Trends and the modern use of reed switches in protection devices // Physmathlit, 2013. - Vol. 4. - P. 58.

10. Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Лысов А.Л., Гатчин Ю.А. Тенденции развития и современное применение герконов в устройствах защиты // Физматлит. Т. 3. М., 2013. С. 398–403.

## Литература

1. Шелепин Н.А. Датчики и микросхемы на базе технологии производства микросхем // Электронные компоненты. 2003. № 2. С. 40–42.

2. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. М., 1992. Кн. 1 – 480 с., кн. 2 – 424 с.

3. Кучерков С.Г. Использование интегрирующих свойств вибрационного микромеханического гироскопа с резонансной настройкой при построении датчика угловой скорости компенсационного типа // Гироскопия и навигация. 2002. № 2 (36). С. 12–18.

4. Расповов В.Я. Микромеханические приборы. Тула, 2004. – 466 с.

5. Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. Долгопрудный, 2011. – 407 с.



Лапшов Сергей Николаевич  
Факультет инженерно-физический  
Кафедра твердотельной оптоэлектроники  
E-mail: serglapshov@gmail.com

## КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗЕЛЕННОГО ЩЕЛОКА ПО СПЕКТРАМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ РЕГЕНЕРАЦИИ ВАРОЧНОГО РАСТВОРА ПРИ СУЛЬФАТНОМ СПОСОБЕ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

С.Н. Лапшов

Научный руководитель – профессор А.Д. Яськов

### Введение

Абсорбционная спектроскопия, особенно в видимой и УФ-областях, – один из наиболее полезных и распространенных методов химического анализа [1–3]. Однако в большинстве

своем он не выходит за рамки лабораторных исследований, хотя его точность во много раз превышает точность методов, основанных на измерении физико-химических свойств веществ (гравиметрический, измерение плотности, проводимости и т. д.) [4–6]. Альтернативным методом контроля состава раствора является определение его показателя преломления [7]. Он применяется в рефрактометрических технологиях, принцип действия которых основан, в частности, на явлении полного внутреннего отражения. Но и здесь есть свои особенности в том плане, что применение данной технологии контроля возможно только в случае, если:

- достоверно известны оптические свойства исследуемого вещества;
- контролируемый раствор можно представить как двухкомпонентную однородную систему;
- состав вещества с течением времени изменяется не существенно.

Конечно, молекулярная спектроскопия не универсальное средство, при помощи которого можно устранить все перечисленные выше недостатки, но одно из неоспоримых его достоинств – это возможность быстрого количественного определения сразу нескольких компонентов изучаемого вещества с точностью измерения молярной объемной концентрации более  $10^{-5}$  моль/литр, что соответствует массовой концентрации  $10^{-2}$  г/литр. Поэтому целесообразно распространить применение УФ-спектроскопии для промышленного анализа химических производств, в частности для определения сульфидности, а также содержания эффективной щелочи и карбоната натрия в зеленом и белом щелоках из сульфатного производства целлюлозы.

На современных заводах, использующих замкнутый цикл производства сульфатной целлюлозы, в процессе регенерации можно восстановить до 95 % первоначального содержания гидроксида натрия для последующего приготовления варочного раствора. Поскольку процесс делигнификации сильно зависит от качества белого щелока, то есть концентрации гидроксида и сульфида натрия, целью каустизации является производство белого щелока с высоким процентным содержанием гидроксида ( $\text{OH}^-$ ), сульфида ( $\text{HS}^-$ ) и малым содержанием карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Для полного возобновления химических компонент перед сжиганием в черный щелок добавляют дешевый минерал сульфит натрия  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , который под действием высоких температур и соответствующей среды восстанавливается до сульфида натрия  $\text{Na}_2\text{S}$ . Таким образом, после сжигания в сорегенерационном котлоагрегате (СРК) черного щелока образуется минеральный продукт – плав, который при последующем разбавлении слабым белым щелоком, в большинстве случаев – водой, образует зеленый щелок. Полное восстановление требуемого химического состава варочного щелока обеспечивается в процессе каустизации зеленых щелоков, состоящем в добавлении к раствору оксида кальция  $\text{CaO}$ . При этом происходят две основные химические реакции. Во-первых, взаимодействие оксида кальция с водой:



В результате данной реакции еще происходит повышение плотности раствора за счет уменьшения количества воды. Во-вторых, взаимодействие карбоната натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Таким образом, в результате химической реакции обмена, происходит восстановление основного варочного компонента – гидроксида натрия:



Далее карбонат кальция идет в известеобжигательную печь, где под действием высоких температур он восстанавливается до оксида кальция для последующих каустизаций, а гидроксид натрия идет на этапы очистки и обогащения [8].

Обнаружено, что при каустизации зеленого щелока дозировка реагентов определяется содержанием в нем карбоната натрия, грубую оценку концентрации которого можно произвести при измерении плотности, которая в свою очередь связана с показателем преломления.

Сегодня для непрерывного контроля процесса регенерации варочных растворов применяют, в основном, автоматические плотномеры и промышленные рефрактометры, которые устанавливаются непосредственно в технологическом потоке. Но при измерении

плотности мы определяем только концентрацию общей щелочи, то есть содержание всех растворимых солей натрия, что не дает объективной информации о том, какое количество оксида кальция нужно для процесса каустизации. Поэтому приходится увеличивать количество реагента, чтобы полностью восстановить варочные компоненты.

На предприятиях делают параллельное, более точное, измерение параметров щелоков при помощи методов аналитической химии. Одним из них является титрование [9]. В виду того, что основными параметрами щелоков являются концентрации титруемой ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ), активной ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$ ) и эффективной ( $\text{NaOH} + 1/2\text{Na}_2\text{S}$ ) щелочей, то при помощи титрования, без труда можно определить их количество. Но для этого нужны лабораторные условия и более 30 мин., что при производстве в промышленных масштабах становится достаточно проблематичным. Поэтому данный способ измерения используется в качестве промежуточного средства контроля приблизительно раз в 4-5 ч при непрерывном способе производства, или при отборе пробы из общего каустизатора при периодическом производстве целлюлозы.

Хотя автоматические титраторы, работающие в режиме реального времени, разработаны и используются в некоторых химических производствах, но высокая стоимость, требовательность к условиям эксплуатации, которые приближаются к лабораторным, частое техническое обслуживание делают их малопригодными для использования на целлюлозных заводах. Помимо этого, разработаны и другие безтитрометрические методы контроля компонент, такие как датчики проводимости [4–6] и обычная УФ-спектроскопия [10]. Они применяются в некоторых случаях для мониторинга крепких белых и зеленых щелоков. Общий недостаток этих приборов в том, что они могут обеспечить контроль только одного компонента. Например, датчик проводимости способен контролировать только концентрацию гидроокиси, да к тому же и с низкой степенью точности. Таким образом, для контроля должна использоваться система, в которую входят сразу несколько датчиков, чтобы можно было одновременно определять концентрации сульфида, гидроокиси и карбоната.

### Эксперимент

По результатам анализа научно-технической литературы [11, 12] и образцов зеленого щелока, предоставленного целлюлозно-бумажным комбинатом, компонентами, вносящими вклад в поглощение в ультрафиолетовой области спектра, оказались водные растворы  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{S}$ . После детального исследования каждого из веществ было сделано заключение о том, что основное поглощение как при формировании края фундаментальной полосы, так и остальных трех полос, вносит продукт реакции гидролитической диссоциации сульфида натрия. В результате гидролитической диссоциации происходит разложение сульфида натрия до гидроокиси натрия и сероводорода:



Можно сказать с высокой степенью точности, что гидролиз идет в основном только по первой ступени реакции, так как константа диссоциации у нее на шесть порядков больше, чем у второй ( $K_1 = 1,0 \cdot 10^{-7}$  и  $K_2 = 1,3 \cdot 10^{-13}$  соответственно). Этим объясняется наличие коэффициента  $1/2$  в значении эффективной щелочи ( $\text{NaOH} + 1/2\text{Na}_2\text{S}$ ), так как одна молекула сульфида натрия в результате гидролиза дает одну молекулу гидроокиси. Также, именно за счет данной реакции, кислотность среды в процессе варки целлюлозы практически не меняется.

Были измерены спектры пропускания растворов зеленых щелоков, предоставленных Сегежским ЦБК. Отобранные образцы имели характерные свойства, присущие всему объему щелока, из которого они были взяты надлежащим образом. Концентрация общей щелочи в них составляла  $C = 50 \div 150$  г/л, и была определена по плотности. Помимо данных образцов в лаборатории были приготовлены несколько проб синтетического белого щелока и водные растворы составляющих его компонент, отличающиеся объемными долями растворителя.

Подготовка образцов проходила следующим образом. При исследовании зеленого щелока, при помощи градуированной пипетки для химического анализа с точностью  $\pm 0,2$  мл производился забор необходимого объема раствора и взвешивался на ювелирных микровесах LT-JS 20, точность которых составляет  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$  г. Таким образом определялась плотность и общая щелочь растворов зеленых щелоков, полученных разбавлением дистиллированной водой в пропорции 1:2 каждого последующего образца. Далее пробы помещали в кварцевую кювету и измеряли их спектр пропускания на спектрофотометре (рис. 1).

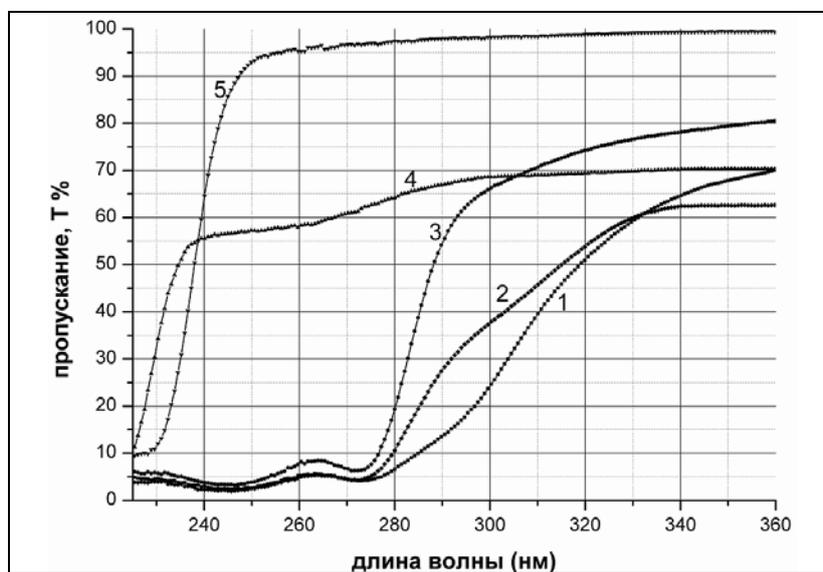


Рис. 1. Спектры пропускания зеленого щелока и водных растворов, составляющих его компонент: 1–зеленый щелок с плотностью  $\rho = 1171,18$  г/дм<sup>3</sup>; 2–раствор белого щелока  $\text{Na}_2\text{S} + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  (в соотношении 1:1:0,5) с плотностью  $\rho = 1140$  г/дм<sup>3</sup>; 3–раствор  $\text{Na}_2\text{S}$  с плотностью  $\rho = 1052,94$  г/дм<sup>3</sup>; 4–раствор  $\text{NaOH}$  с плотностью  $\rho = 1203,33$  г/дм<sup>3</sup>; 5–раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с плотностью  $\rho = 1136,47$  г/дм<sup>3</sup>

Похожим образом готовились растворы основных компонент, сульфида, гидроокиси и карбоната натрия, входящих в состав зеленого щелока. Сначала делали высококонцентрированный раствор, практически, по пределу растворимости в воде при 20 °С. На весах измерялась масса вещества, а с помощью градуированной пипетки – объем растворителя, в данном случае – дистиллированной воды. По значению этих параметров вычислялась молярная объемная концентрация каждого компонента по формуле:

$$C_M = \nu/V, \quad (5)$$

где  $\nu$  – количество растворенного вещества в молях;  $V$  – объем раствора в литрах.

Знание этих величин необходимо для нахождения молярного коэффициента экстинкции, каждого из веществ. Все реактивы, использованные в работе, были квалификации «особо чистые» или «чистые для анализа». Исходный раствор, содержащий сульфид-ионы, готовили из навески  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ .

Измерение ультрафиолетового коэффициента пропускания  $T(\lambda)$  в растворах щелоков производилось в области длин волн  $\lambda = 225\text{--}400$  нм при  $T = 20$  °С с использованием спектрофотометра, который представлен на рис. 5. В качестве эталона коэффициента пропускания  $T(\lambda) = 100\%$  принималась стандартная кювета из кварцевого стекла КУ-1 с длиной прохода 5 мм, заполненная дистиллированной водой.

Необходимо следить за тем, чтобы растворы были гомогенными и не мутными – это необходимое условие воспроизводимости данных. Особенно мешают измерениям пузырьки воздуха, сильно увеличивающие рассеяние. Нельзя наливать в кювету очень холодный раствор, поскольку при этом на наружных ее стенках собирается конденсат и они становятся непрозрачными. Одной из немаловажных проблем также является присутствие в растворе непоглощающих в интересующей области спектра примесей, которые могут влиять на

показатель преломления щелока. Это влечет за собой изменение длины оптического пути, что в свою очередь сказывается на спектрах оптической плотности и, как следствие, – на точности измерений.

### Результаты

Спектр оптической плотности зеленого щелока представлен на рис. 2. В нем можно заметить две аналитические полосы, отображающие качественную индивидуальность компонента, входящего в состав раствора.

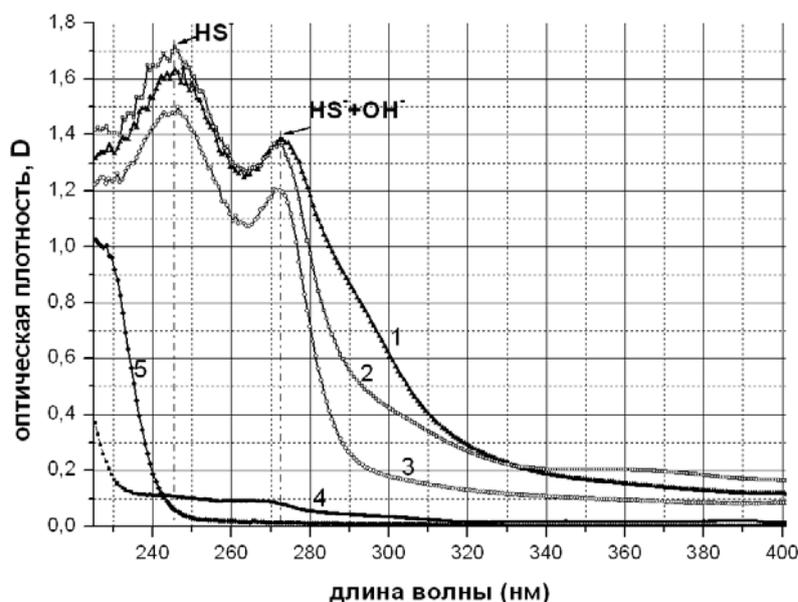


Рис. 2. Спектры оптической плотности зеленого щелока и водных растворов, составляющих его компонент: 1 – зеленый щелок с плотностью  $\rho = 1171,18 \text{ г/дм}^3$ ; 2 – раствор белого щелока  $\text{Na}_2\text{S} + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$  (в соотношении 1:1:0,5) с плотностью  $\rho = 1140 \text{ г/дм}^3$ ; 3 – раствор  $\text{Na}_2\text{S}$  с плотностью  $\rho = 1052,94 \text{ г/дм}^3$ ; 4 – раствор  $\text{NaOH}$  с плотностью  $\rho = 1203,33 \text{ г/дм}^3$ ; 5 – раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с плотностью  $\rho = 1136,47 \text{ г/дм}^3$

Природа полос поглощения в ультрафиолетовой области спектра (10–400 нм) связана главным образом с числом и расположением электронов в поглощающих молекулах и ионах. Надо также помнить, что в растворе вклад в поглощение вносит не само растворенное вещество, а продукт его гидролитической диссоциации. За фундаментальную полосу поглощения с максимумом на 245 нм, ответственен продукт неполного разложения в результате гидролиза сульфида натрия, анион  $\text{HS}^-$ . Полоса с максимумом поглощения на длине волны 273 нм. соответствует сумме вкладов оптической плотности от гидроксильной группы  $\text{OH}^-$  и сульфид-аниона  $\text{HS}^-$ . Аналитическая полоса карбоната и гидроксида натрия находится вблизи вакуумного УФ-диапазона, что выходит за пределы измерения нашего спектрофотометра, но приблизительно оценить их вклад в светопоглощение мы можем, используя закон аддитивного сложения оптических плотностей.

Измерение концентраций компонент в растворах зеленых щелоков производилось методом молярного коэффициента поглощения. Он основан на пропорциональной зависимости между светопоглощением и концентрацией поглощающего вещества. При работе по этому методу мы определяли оптическую плотность нескольких стандартных растворов  $D_{cm}$  на длине волны, соответствующей максимуму поглощения внутри аналитической полосы, принадлежащей исследуемому компоненту раствора, затем для каждого из них рассчитывали молярный коэффициент экстинкции по выражению:

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{D_{cm}}{(l \cdot C_{cm})}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина прохода кюветы, см;  $C_{cm}$  – молярная концентрация растворенного компонента, моль/литр.

Одним из необходимых условий применения данного метода является соблюдение в анализируемой системе, особенно в области исследуемых концентраций, закона Бугера-Ламберта-Бера.

Пропускание стандартных растворов измерялось относительно растворителя, затем вычислялась оптическая плотность и строился график зависимости  $C(D)$ . Полученная градуировочная или калибровочная кривая имела вид прямой. Таким образом по ней можно найти концентрацию  $C_x$  опытного раствора, предварительно определив оптическую плотность  $D_x$  и сопоставив ее значение оси абсцисс на графике. Результаты измерения оптической плотности и соответствующих им концентраций стандартных растворов сульфида натрия для полосы с максимумом поглощения на длине волны 273 нм приведены на рис. 3а.

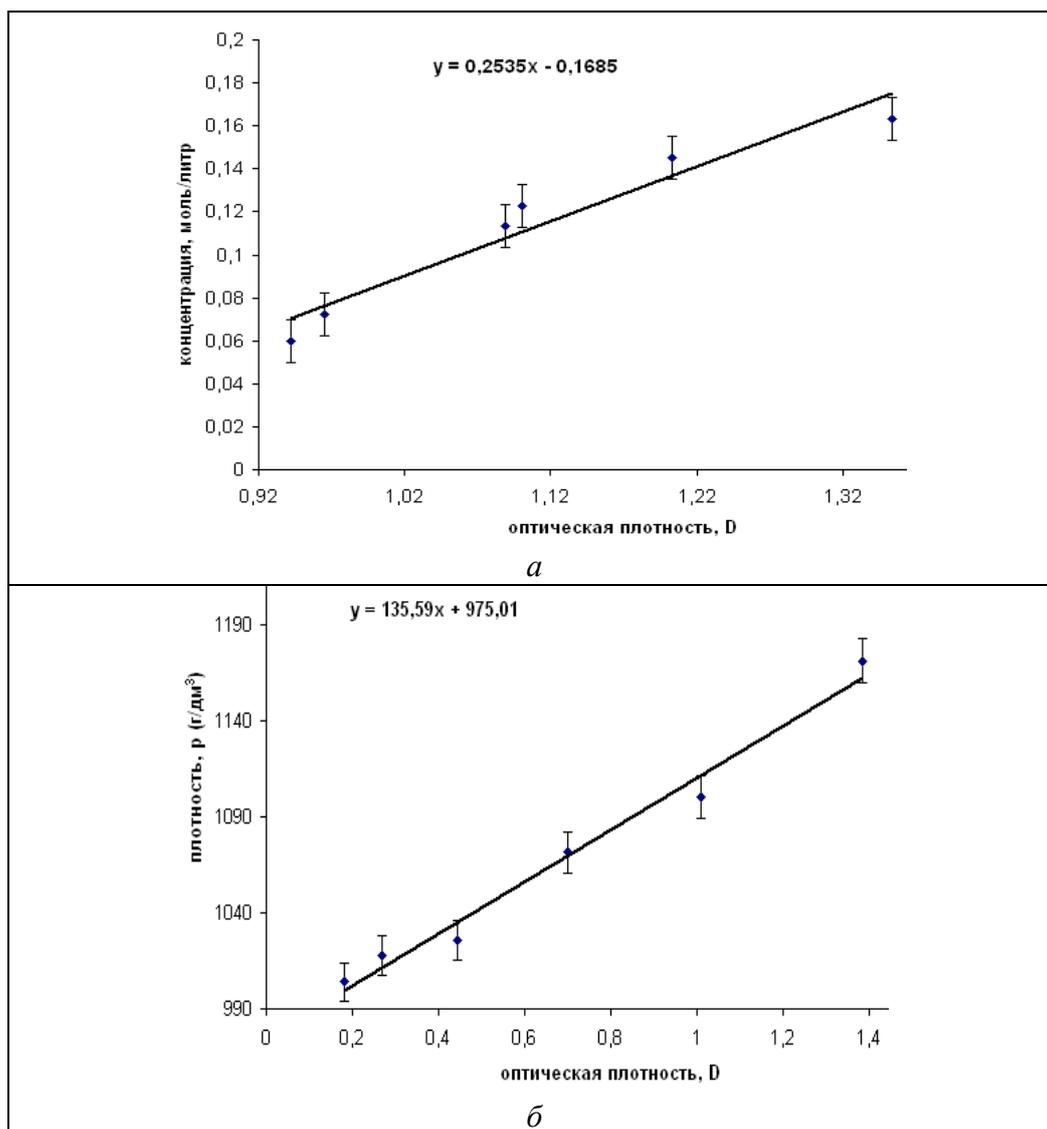


Рис. 3. Калибровочные кривые для растворов зеленого щелока и его компонент (точки – экспериментальные данные, прямые – рассчитанные теоретически): а – водные растворы сульфида натрия; б – растворы зеленого щелока. Оптическая плотность приведена для полосы с максимумом поглощения на длине волны 273 нм

На поле рисунка приведено уравнение интерполяции экспериментальных данных. Как видно, они хорошо описываются прямой с соответствующими коэффициентами. Полученная прямая не выходит за планки погрешности в 10 %, установленных в точках, измеренных в эксперименте.

Калибровочная кривая  $P(D)$  для растворов зеленого щелока (рис. 3б) может быть использована для калибровки промышленных спектрофотометров, установленных на линии каустизации. Экспериментальные данные, отмеченные точками, хорошо интерполируются

уравнением кривой первого порядка, которая не выходит за планки погрешности, имеющие значение 1 %.

Как известно, спектрофотометрическим методом можно определять компоненты смеси двух и более веществ. Эти измерения основаны на свойстве аддитивности оптической плотности:

$$D_{см} = D_1 + D_2 + \dots + D_n, \quad (7)$$

где  $D_{см}$  – оптическая плотность смеси;  $D_1, D_2, D_n$  – оптические плотности для различных компонентов смеси. Этим фактом можно воспользоваться для определения концентрации карбоната натрия, так как у него наблюдается только одна аналитическая полоса с длиной волны  $\lambda = 225$  нм, соответствующей максимуму поглощения, которая перекрывается полосами гидрооксид и сульфид ионов. Поэтому, отдельно измерив пропускание растворов с известным содержанием гидроокиси и сульфида натрия, и рассчитав по спектрам их оптические плотности, по выражению (7), можно вычислить оптическую плотность, которая вносится карбонат-ионами, а затем, по выражению (6), определить их концентрацию.

### Спектрофотометр

Одной из основных целей химического цикла восстановления на целлюлозно-бумажных заводах является регенерация гидроксида натрия для его последующего использования при варке целлюлозы. Это связано с тем, что процесс делигнификации, характеризующийся высокой скоростью и селективностью, существенно зависит от качества белого щелока, то есть от концентраций NaOH и Na<sub>2</sub>S. Именно поэтому, целью восстановления является производство белого щелока с высокими концентрациями NaOH и Na<sub>2</sub>S и низкими концентрациями Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Надежный, быстрый, точный и полный анализ состава белого и зеленого щелока в режиме реального времени (в основном это значения концентраций гидроксида (или щелочи), карбоната, сульфида) позволяет операторам лучше контролировать процесс каустизации при производстве высококачественных белых щелоков, что в свою очередь, способствует повышению качества целлюлозы и снижению эксплуатационных издержек. К сожалению, большинство целлюлозных заводов во всем мире полагаются на классические методы титрования при определении концентрации гидроксида (или щелочи), карбоната, сульфида в белом и зеленом щелоках. Поскольку метод титрования может быть выполнен только в автономном режиме и занимает около 30 мин, то им можно контролировать состав зеленого и белого щелока только каждые 2 или 4 ч и нет возможности непрерывного отслеживания процесса каустизации, что приводит к снижению производительности и эффективности.

В связи с высокими требованиями к техническому обслуживанию автоматические титраторы, работающие в режиме реального времени, не были широко приняты для работы в заводских условиях. Большой интерес для экспресс-анализа щелока вызывает развитие датчиков на безтетрометрической основе.

В разное время были разработаны датчики проводимости и обычной ультрафиолетовой (УФ) спектроскопии. Однако они могут обеспечить измерение только одной компоненты раствора. Например, датчик проводимости отслеживает изменение концентрации только гидроксида, а ультрафиолетовый спектрометр применяется для контроля сульфида натрия. Существенным недостатком абсорбционной УФ-спектроскопии является необходимость предварительного разбавления образцов растворов, взятых непосредственно с производства, что связано с их высокой оптической плотностью. А это ставит под угрозу не только точность измерения, но также делает невозможным объективное определение концентрации сульфида натрия из-за высокой степени растворения кислорода в воде (сульфид легко окисляется растворенным в воде кислородом – равновесная константа растворения кислорода при комнатной температуре в воде имеет тот же порядок, что и у сульфида). Таким образом, для мультикомпонентного анализа целесообразно совместное использование описанных датчиков.

Спектрофотометр может быть использован для быстрого и одновременного определения гидроксида, сульфида и карбоната в щелоках на различных этапах их регенерации. Измерение в реальном времени достигается с помощью проточной кюветы совмещенной со стандартным УФ-спектрофотометром.

Работа спектрофотометра основана на явлении нарушения полного внутреннего отражения (НПВО) в УФ-области спектра. Принципиальная схема измерительного НПВО-зонда изображена на рис. 4. Прозрачный зонд с высоким показателем преломления  $n_p$ , лучше всего из кварцевого стекла, приводится в контакт с образцом, который должен иметь меньший показатель преломления  $n_s$ . Свет вводится в зонд под углом падения  $\theta$  к границе раздела между зондом и образцом. Если угол падения имеет значение больше критического угла  $\theta_c$ , то тогда согласно закону Снеллиуса:

$$\sin \theta_c = \frac{n_s}{n_p}, \quad (8)$$

будет происходить полное отражение. При каждом отражении часть света, длина волны которого соответствует линии поглощения определяемого вещества, будет попадать в среду (образец) в виде затухающих волн и поглощаться образцом. Таким образом, свет, который пройдет к датчику, будет нести в своем спектре информацию о физических свойствах образца и может быть зарегистрирован на спектрометре.

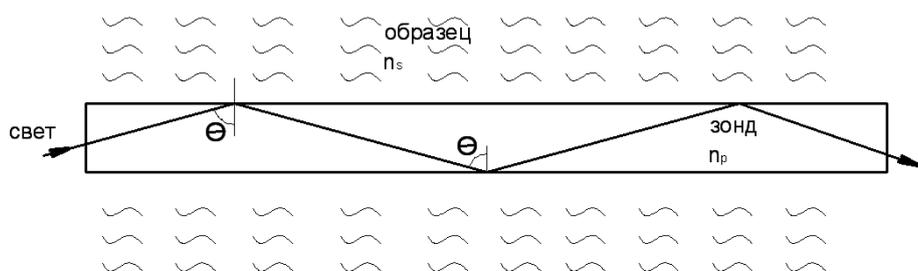


Рис.4. Схема измерительного зонда

Пропускание в абсорбционной спектроскопии подчиняется закону Бера:

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\varepsilon \cdot C \cdot b_{eff}), \quad (9)$$

где  $T$  – пропускание при одном отражении,  $I$  и  $I_0$  – отраженная от образца и падающая спектральные интенсивности,  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения,  $C$  – молярная концентрация вещества, которая будет проанализирована,  $b_{eff}$  – эффективная длина пути поглощения за один проход.

Калибровка прибора может производиться с помощью набора данных из образцов щелоков, взятых непосредственно с целлюлозного производства и приготовленных из заводских растворов зеленого и белого щелоков (базовый раствор), через разбавление и добавление гидроксида натрия, сульфидов и карбонатов. Концентрации гидроксида, сульфида и карбоната в эталонных образцах могут быть определены путем титрования.

В наших исследованиях для изучения оптических свойств зеленых щелоков и определения характерных линий поглощения, с различным процентным содержанием трех основных компонент, мы пользовались лабораторным спектрофотометром, схема которого приведена на рис. 5.

Метод НПВО-измерения непосредственно применяли к одному образцу зеленого и трем образцам растворов белого щелока, взятых с одного целлюлозного завода. Было получено хорошее согласование между НПВО-измерениями и титрованием для определения концентрации гидроксида, сульфида и карбоната.

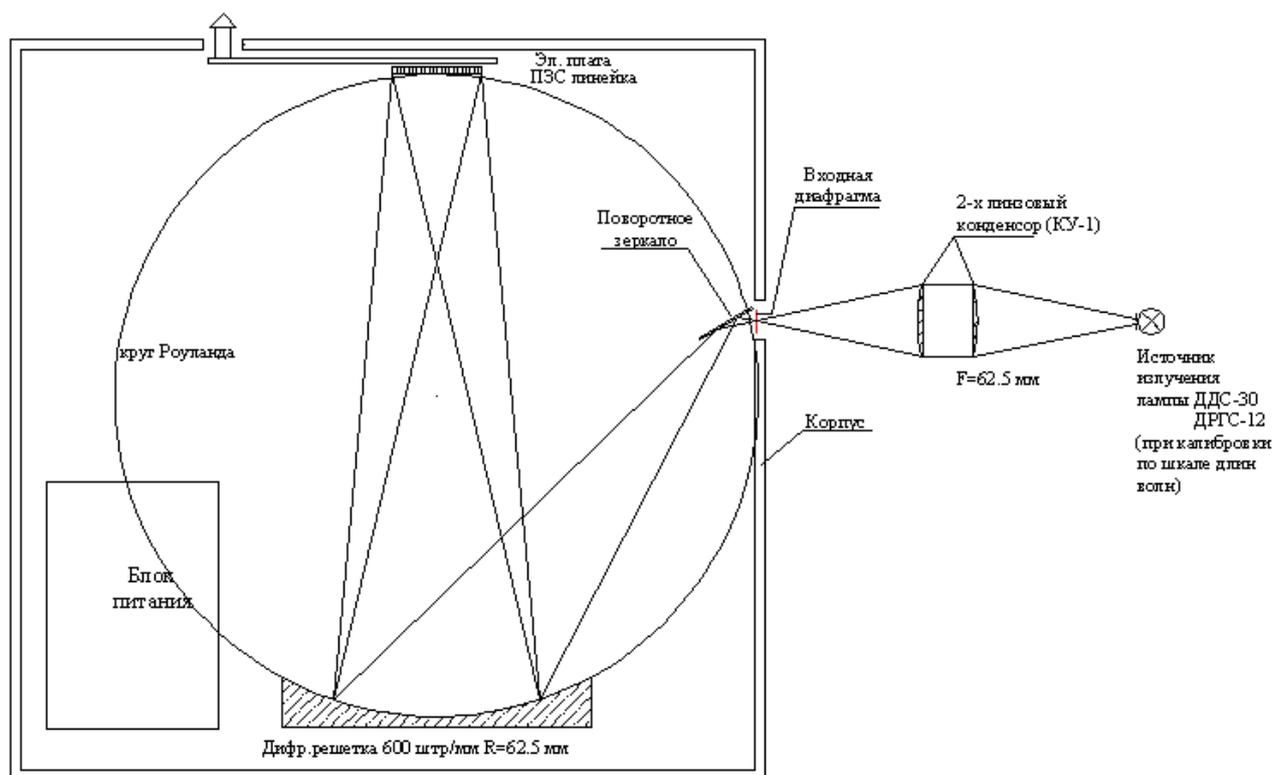


Рис. 5. Оптическая схема спектрофотометра

### Заключение

Спектрофотометрические методы анализа применяются для контроля разнообразных производственных процессов. Они могут быть применены для анализа больших и малых содержаний веществ в растворах, но особенно ценной их особенностью является возможность определения примесей (до  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  %).

Методы, основанные на явлении НПВО быстрые, точные и не требуют предварительной подготовки образцов. Поэтому они могут применяться в режиме реального времени для управления технологическими процессами в условиях завода. Благодаря низкой стоимости, надежности и простоте в обслуживании техника на основе НПВО может составить хорошую альтернативу методам с использованием ИК-спектроскопии.

### Публикации

1. Лапишов С.Н., Майоров Е.Е., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. Применение ультрафиолетовой спектроскопии для контроля общей щелочности зеленых щелоков в производстве сульфатной целлюлозы // Сб. статей XIV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». Т. 2. СПб., 2012. С. 268–272.
2. Лапишов С.Н. Оптические свойства щелоков и рефрактометрические методы и средства их контроля в сульфатном производстве целлюлозы // Аннотированный сб. научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 50–53.
3. Лапишов С.Н., Майоров Е.Е., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. Влияние химического состава зеленого щелока на оптическое поглощение в ультрафиолетовой области спектра // Сб. статей XV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». Т. 1. СПб., 2013. С. 116–120.
4. Лапишов С.Н., Шерстобитова А.С. О возможности контроля химических свойств зеленого щелока методом ультрафиолетовой спектроскопии в технологических потоках регенерации

варочных растворов производства сульфатной целлюлозы // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 35–38.

### Литература

1. Берштейн И.Я. Спектрофотометрический анализ в органической химии. М., 1986. – 200 с.
2. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М., 1979. – 480 с.
3. Бахшиев Н.Г. Введение в молекулярную спектроскопию: Учеб. пособие. Л., 1987. – 216 с.
4. Paulonis M.A., Krishnagopalan G.A. Kraft liquor alkali analysis using in-situ conductivity sensor // Tappi Journal. 1990. Vol. 73. No 6. P. 205–211.
5. Bertelsen P.M., Svensson J.O. Sensor-based causticizing control // Tappi Journal. 1986. Vol. 69. No 8. P. 72.
6. Dorris G.M., Allen L.H. Conductivity sensors for slaker control. P. I: Laboratory results // Journal of Pulp and Paper Science. 1989. Vol. 15. No 4. P. J122–J131.
7. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л., 1983. – 352 с.
8. Миловидова Л.А., Севастьянова Ю.В., Комарова Г.В., Дубовый В.К. Регенерация химикатов в производстве сульфатной целлюлозы. Каустизация и регенерация извести. Архангельск, 2010. – 157 с.
9. Золотов Ю.А., Дорохова Е.Н., Фадеева В.И. и др. Основы аналитической химии. Методы химического анализа: Учеб. для вузов. М., 2004. – 503 с.
10. Paulonis M.A., Krishnagopalan G.A. Kraft white and green liquor composition analysis. P. I. Discrete sample analyzer // Journal of Pulp and Paper Science. 1994. Vol. 20. No 9. P. J254–J258.
11. Chai X.S., Li J., Zhu J.Y. An ATR-UV sensor for simultaneous on-line monitoring of sulphide, hydroxide and carbonate in kraft white liquors during mill operations // Journal of Pulp and Paper Science. 2002. Vol. 28. No 4. P. 110–114.
12. Утегенов М.М., Копылова Е.А., Естемесов З.А. Об электронных спектрах синтетических водно-щелочных растворов // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева. 2006. С. 90–96.



**Миронов Леонид Юрьевич**  
Факультет фотоники и оптоинформатики  
Кафедра оптоинформационных технологий и материалов  
E-mail: lu.mironov@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НАНОЧАСТИЦ ИЗ КОМПЛЕКСОВ ЛАНТАНИДОВ, ДОПИРОВАННЫХ ДВУМЯ РАЗЛИЧНЫМИ КРАСИТЕЛЯМИ

Л.Ю. Миронов

Научный руководитель – профессор В.Л. Ермолаев

### Введение

В данной работе исследовались наночастицы, формирующиеся в водных растворах и состоящие из комплексов лантанидов с  $\beta$ -дикетонами. В 2008 г. было обнаружено [1], что при формировании таких наночастиц возможен захват ими молекул красителей, содержащихся в растворе. При этом наблюдается сенсibilизованная флуоресценция красителей, возникающая при возбуждении наночастиц в области поглощения комплексов, расположенной в ультрафиолетовом диапазоне. В таких системах возможно получение значительного усиления флуоресценции красителей за счет аккумуляции энергии с большого

числа комплексов, образующих наночастицы, что позволяет понижать пределы определения флуоресцирующих красителей в водных растворах. Интерес к исследованию обеспечивается потенциальным применением флуоресцирующих наночастиц в области биологических исследований и иммуно-флуоресцентного анализа. Существует большое количество работ, рассматривающих в качестве люминесцентных меток различные системы, такие как: силикатные наночастицы, допированные ионами лантанидов или молекулами красителей; фосфатные наночастицы, допированные ионами лантанидов; полимерные наночастицы и квантовые точки. Значительное внимание, проявляемое к данной области исследований, делает актуальным поиск систем, способных выполнять функцию люминесцентных меток.

### Задачи проекта

Были выделены три основные задачи проекта, важные для практического применения исследуемых флуоресцентных наночастиц.

1. Определение возможности одновременного контроля двух различных красителей в водно-спиртовых растворах путем сенсбилизации их флуоресценции в наночастицах из комплексов лантанидов. Данная задача актуальна для проведения иммуно-флуоресцентного анализа с несколькими маркерами одновременно. Необходимо было выяснить пределы возможных концентраций, при которых отсутствует значительное взаимодействие между различными флуоресцентными маркерами (молекулами красителей).

2. Исследование возможности создания наночастиц с поглощением в видимой области спектра, способных сенсбилизировать молекулы красителей без использования ультрафиолетового излучения. Поскольку предполагаемое их применение лежит в области биологических и медицинских исследований, актуальным является получение систем, способных к возбуждению флуоресценции в видимом диапазоне спектра. Это связано с тем, что ультрафиолетовое излучение, обладающее большей энергией кванта, нежели видимое, способно к разрушению биологических объектов.

3. Исследование возможности уменьшения процесса тушения на примесях при миграции энергии по наночастицам с помощью ввода большого количества красителя, способного конкурировать с примесью за энергию, поглощенную наночастицами. Поскольку эффективная сенсбилизация флуоресценции молекул красителей в исследованных наночастицах обуславливается наличием миграции энергии по возбужденным синглетным уровням комплексов лантанидов, образующих наночастицы, наличие тушащих примесей может значительно снизить показатели усиления флуоресценции. Обычным методом борьбы с примесями является химическая очистка исходных компонентов. В данной работе была рассмотрена возможность подавления тушения на примесях путем ввода большого количества красителя, способного конкурировать за энергию, поглощенную наночастицами, и эффективно сенсбилизировать красители с нижележащими уровнями энергий.

### Методы исследования

Для приготовления наночастиц использовались химически чистые нитраты лантана и лютеция, дикетоны *n*-фенилбензоилтрифторацетон (PhBTA) и нафтаилтрифторацетон (NTA) фирмы Aldrich (99 %), 1,10-фенантролин (phen) фирмы Chemapol. Синтез наночастиц проводился в водно-спиртовых растворах с объемной долей изопропилового спирта (ОСЧ) 10 % для дикетона PhBTA и 1–3 % для NTA. Количество спирта определяется растворимостью комплексов использованных  $\beta$ -дикетонов с ионами лантанидов в воде. Выбор ионов лютеция и лантана обусловлен отсутствием у них энергетических уровней, подходящих для переноса энергии от возбужденных состояний комплексов. В качестве флуоресцирующих красителей использовались кумарин 30 (C30), родамин 6G (R6G) и нильский синий (NB). Их выбор обусловлен хорошей растворимостью и значительным квантовым выходом в условиях эксперимента. Кроме того, результаты предыдущих исследований показали, что краситель C30 способен внедряться в исследуемые наночастицы в больших количествах [2].

Сборка дикетонатных комплексов лантанидов в наночастицы происходит по причине их гидрофобности. Синтез наночастиц проводился при добавлении в водно-спиртовой раствор,

содержащий требуемые концентрации ионов металлов и красителей, концентрированного раствора дикетона и 1,10-фенантролина. Спектры поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции анализировались в течении 2-3 мин. после образования наночастиц. Спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции исследуемых систем измерялись на флуориметре Hitachi 650-40, спектры поглощения – на спектрофотометре Varian Cary 500 в односантиметровых кварцевых кюветах.

## Основные достигнутые результаты

### Сенсибилизация флуоресценции низких концентраций двух разных красителей

В работе [3] приведены результаты исследования наночастиц из комплексов лантанидов с дикетонами при концентрациях, равных используемым в данном проекте. Средний размер наночастиц в таких условиях составляет 10 нм, что позволяет оценить количество комплексов, их составляющих. При используемых концентрациях дикетонов и количестве комплексов в наночастице порядка 1000, концентрация наночастиц в растворе составляет ~10 нМ. Отсюда следует, что при суммарной концентрации двух разных красителей менее 10 нМ можно ожидать, что интенсивность их сенсибилизированной флуоресценции будет независима друг от друга. Этот факт был продемонстрирован при формировании наночастиц в растворе, содержащем одновременно 1 нМ R6G и 2 нМ NB (рис 1а, 1б и 1в). На рис. 1а и 1б представлены спектры сенсибилизированной флуоресценции систем, содержащих либо 1 нМ красителя R6G, либо 2 нМ красителя NB. На рис. 1в представлен спектр сенсибилизированной флуоресценции при добавлении аналогичных концентраций красителей в один раствор. Можно видеть, что интенсивность сенсибилизированной флуоресценции этих красителей  $I_{sfl}$  осталась неизменной по отношению к растворам, содержащим только один из красителей.

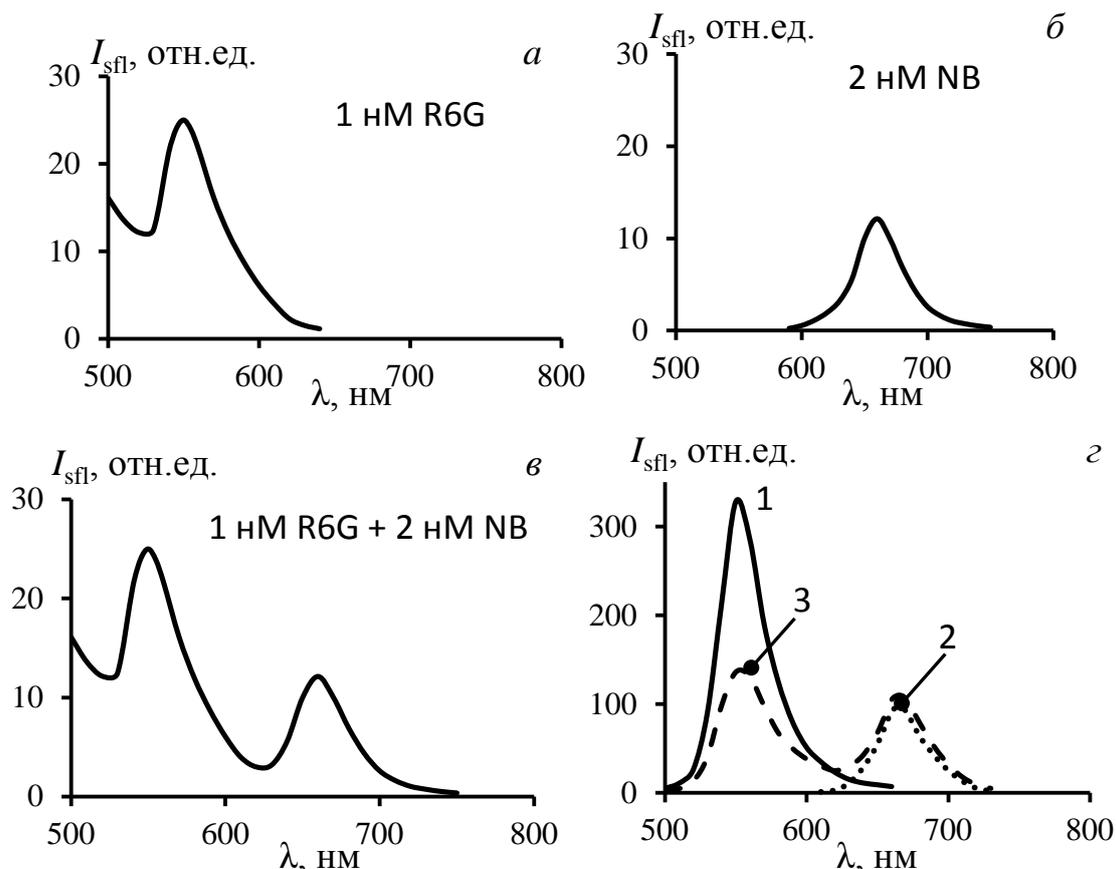


Рис. 1. Спектры сенсибилизированной флуоресценции красителей R6G и NB

Априори не ясно, при каких концентрациях исследуемых красителей можно будет наблюдать перенос энергии между ними. Была исследована сенсибилизированная флуоресценция красителей в растворах, содержащих одновременно 5, 10 и 20 нМ красителей R6G и NB. При концентрациях в 5 и 10 нМ спектры сенсибилизированной флуоресценции при

допировании наночастиц только одним красителем совпадают со спектрами при допировании наночастиц обоими красителями в пределах экспериментальной погрешности. На рис. 1г приведены спектры сенсibilизованной флуоресценции при концентрациях каждого из красителей в растворе 20 нМ (1 – краситель R6G, 2 – NB, 3 – 20 нМ R6G + 20 нМ NB). Из рис. 1г видно, что при суммарной концентрации красителей 40 нМ наблюдается перенос энергии от R6G, имеющего вышележащий возбужденный уровень, на NB. Несмотря на то, что при данной концентрации все еще возможно наблюдение спектров каждого из красителей, можно ожидать, что при дальнейшем повышении их концентрации флуоресценция красителя с вышележащим уровнем будет сильно тушиться вторым красителем.

### Подавление тушения на примесях с помощью ввода в наночастицы большого количества конкурентного красителя

В работе [2] было показано, что C30 внедряется в исследуемые наночастицы в концентрациях, сравнимых с концентрацией комплексов в них. При этом не наблюдалось концентрационное тушение C30 и присутствовала миграция энергии по его молекулам. Эти обстоятельства позволяют надеяться, что возможен полный перенос энергии от комплексов на C30 с последующей сенсibilизацией второго красителя, возбужденный уровень которого лежит ниже, возбужденного уровня C30. Для проверки этого утверждения были проведены сопоставления интенсивностей сенсibilизованной флуоресценции красителей R6G и NB при возбуждении в полосу поглощения НЧ в присутствии и отсутствии 1 мкМ C30. Данные приведены в Табл. 1. Величины сенсibilизованной флуоресценции даны в относительных единицах с учетом спектральной чувствительности прибора. В качестве дикетона использован *n*-фенилбензоилтрифторацетон.

Таблица 1

Влияние внедрения 1 мкМ C30 в НЧ на интенсивность сенсibilизованной флуоресценции NB или R6G.

R6G или NB, нМ	R6G		1 мкМ C30 + R6G			NB		1 мкМ C30 + NB		
	$\lambda_{\text{сfl}}$ R6G, нМ	$I_{\text{сfl}}$ R6G	$I_{\text{сfl}}$ R6G	$\lambda_{\text{сfl}}$ C30, нМ	$I_{\text{сfl}}$ C30	$\lambda_{\text{сfl}}$ NB, нМ	$I_{\text{сfl}}$ NB	$I_{\text{сfl}}$ NB	$\lambda_{\text{сfl}}$ C30, нМ	$I_{\text{сfl}}$ C30
0	-	-		520	2400	-	-	-	520	2400
10	550	200	2000	518	1200	663	60	500	518	850
20	552	380	4200	~515	600	665	110	750	516	480
50	554	660	5500	~513	330	667	250	1000	514	420
100	558	1040	7300	~512	195	668	240	1000	514	270
200	562		3480		120	670				

Для наглядности изменение интенсивности сенсibilизованной флуоресценции под влиянием добавленного C30 выделено в таблице жирным шрифтом. Наибольшее усиление достигается для маленьких концентраций усиливаемого красителя. При сравнении третьего и четвертого столбцов, а также восьмого и девятого видно, что возможно получить четырехдесятикратное усиление сенсibilизованной флуоресценции при допировании наночастиц дополнительным 1 мкМ C30.

Стоит отметить, что при концентрации усиливаемых красителей свыше 100 нМ начинается их концентрационное тушение, что можно видеть на примере R6G. Также в Табл. 1 приведены данные о тушении собственной флуоресценции C30. Видно, что при повышении концентрации R6G и NB, наблюдается десятикратное тушение флуоресценции C30. Одновременно происходит сдвиг максимума его спектра в коротковолновую область, что свидетельствует об уменьшении длины пробега синглетного возбуждения по его молекулам. Эти обстоятельства свидетельствуют о наличии эффективного переноса энергии от молекул C30 на красители R6G и NB и возможности на порядок усилить сенсibilизованную флуоресценцию малых концентраций красителей.

Для проверки справедливости данного вывода было проведено исследование влияния 1 мкМ С30 на сенсibilизованную флуоресценцию NB в наночастицах из комплексов нафтоилтрифторацетона. Полученные данные приведены в Табл. 2. Величины сенсibilизованной флуоресценции даны в относительных единицах с учетом спектральной чувствительности прибора.

Таблица 2

Влияние внедрения 1 мкМ С30 в НЧ из комплексов NTA на интенсивность сенсibilизованной флуоресценции NB

NB, нМ	NB	1 мкМ С30 + NB	
	$I_{sfl}$ NB	$I_{sfl}$ NB	$I_{sfl}$ С30
0	-	-	4800
10	140	765	3500
20	250	910	3200
50	560	1560	1950
100	840	2160	1140

Из сравнения второго и третьего столбцов видно, что присутствие С30 в структуре наночастиц увеличивает сенсibilизованную флуоресценцию NB. Также можно увидеть эффект тушения флуоресценции С30, что свидетельствует о переносе энергии от него на NB. Видно, что по сравнению с наночастицами, синтезированными из дикетона PhBTA, в этом случае наблюдается некоторое различие в абсолютных интенсивностях сигналов, а также в величинах усиления и тушения для идентичных концентраций красителей. Это может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, при использовании NTA необходимы другие исходные концентрации органической части наночастиц и ионов лантанидов, что приводит к различному поглощению систем, а также может влиять на размер образующихся наночастиц. Во-вторых, наночастицы из комплексов NTA синтезировались в растворе с более низким содержанием спирта, нежели наночастицы из комплексов PhBTA, что может сказываться на ассоциации красителя С30 слаборастворимого в чистой воде. Однако тенденция к усилению флуоресценции малых концентраций красителя при вводе большого количества С30, несомненно, присутствует.

Интересным является вопрос, возможно ли усиление флуоресценции в других парах красителей, нежели описанные выше. Несмотря на то, что С30 является уникальным красителем, способным в больших количествах встраиваться непосредственно в комплексы лантанидов с дикетонами, основным фактором, определяющим эффективный перенос энергии в данных системах, является наличие миграции энергии по возбужденным состояниям молекул. Из Табл. 1 можно заметить, что увеличение концентрации красителя R6G сопровождается сдвигом максимума его флуоресценции от 550 до 562 нм, что является признаком наличия миграции энергии по его молекулам. Таким образом, несмотря на значительно худшее внедрение молекул R6G в наночастицы, по сравнению с С30, интересно проверить влияние большого количества R6G на сенсibilизованную флуоресценцию NB.

Судя по рис. 2, неожиданным фактом оказалось то, что введение в НЧ большого количества R6G оказывает больший эффект на усиление NB, нежели введение С30. При добавлении 1 мкМ R6G в раствор, в НЧ его переходит только 10–20 %. Возможных причин более эффективного усиления флуоресценции может быть несколько. Во-первых, это неравномерное распределение катионных красителей в наночастицах в отличие от нейтрального красителя С30. Во-вторых, наличие у R6G более низкого возбужденного уровня по сравнению с С30, что может положительно сказаться на конкуренции за энергию возбуждения с тушащими примесями. В-третьих, наличие лучшего перекрытия спектров у R6G и нильского синего, нежели у С30 и нильского синего.

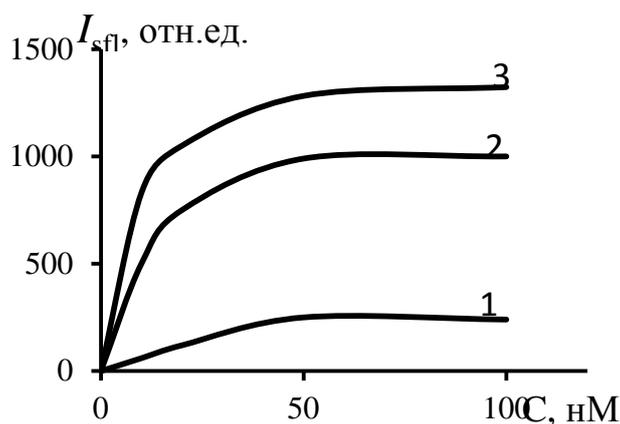


Рис. 2. Зависимость интенсивности сенсibilизированной флуоресценции  $NB$  от его концентрации в НЧ из комплексов PhBTA (1); в аналогичных НЧ, допированных 1 мкМ C30 (2); в аналогичных НЧ, допированных 1 мкМ R6G(3)

**Создание наночастиц с поглощением в видимой области спектра, способных сенсibilизировать молекулы красителей без использования ультрафиолетового излучения**

Создание флуоресцирующих маркеров, способных к возбуждению флуоресценции в видимой области является актуальной задачей и может найти применение в области биологических и медицинских исследований. Это позволяет как возбуждать флуоресценцию квантами меньшей энергии, что необходимо для работы с объектами, чувствительными к УФ-излучению, так и увеличить суммарное поглощение системы при возбуждении сплошным спектром, что может поднять выходной сигнал.

Поскольку из предыдущих работ известно [2], что C30 обладает способностью внедряться в матрицу наночастиц в большом количестве, а также обладает значительным поглощением в видимой области спектра, логично было бы использовать эту его способность для сенсibilизации других красителей.

На рис. 3 приведен спектр возбуждения для системы, содержащей 1 мкМ C30 и 100 нМ R6G, совмещенный со спектром поглощения этой же системы. Некоторое их несовпадение в коротковолновой части спектра объясняется наличием свободного дикетона в растворе, не собравшегося в комплексы лантанидов. Из спектра возбуждения видно, что сенсibilизация флуоресценции R6G через полосу поглощения C30 (в области 450 нм) менее эффективна, чем сенсibilизация через полосу поглощения комплексов (в области 360 нм). Однако, в данной системе возможно повышение количества C30 в наночастицах, что открывает путь для увеличения эффективности сенсibilизации красителей излучением видимого спектра.

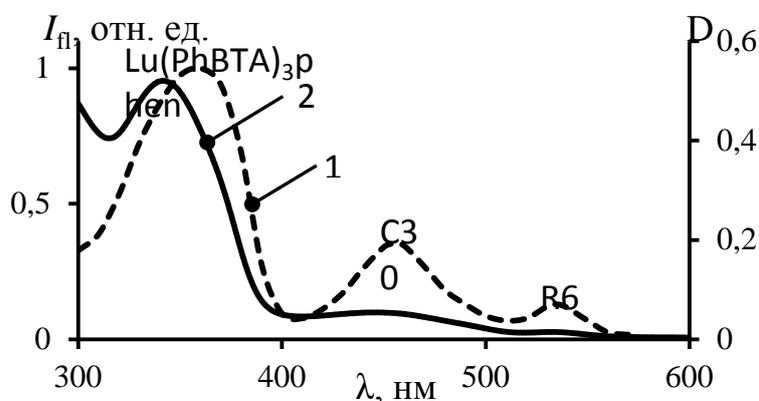


Рис. 3. Спектр возбуждения флуоресценции R6G в НЧ из комплексов PhBTA, допированных 1 мкМ C30 и 100 нМ R6G,  $\lambda_{регистр} = 590$  нм (1), спектр поглощения этой же системы (2)

**Области возможного использования результатов проекта**

Основной областью возможного применения результатов проекта является иммунофлуоресцентный анализ, в котором различные молекулы красителей могут расширить число

используемых флуоресцентных маркеров. Также стоит отметить, что синтезируемые наночастицы обладают небольшим размером и большой яркостью флуоресценции, что может быть актуально для конформационных исследований сложных биологических объектов.

### Публикации

1. *Миронов Л.Ю., Свешникова Е.Б., Ермолаев В.Л.* Взаимовлияние двух разных красителей на их сенсбилизированную флуоресценцию (кофлуоресценцию) в наночастицах из комплексов // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. № 4. С. 581–590.
2. *Mironov L.Yu., Sveshnikova E.B., Ermolaev V.L.* The mutual influence of two different dyes on their sensitized fluorescence (cofluorescence) in nanoparticles from complexes // Optics and Spectroscopy. 2013. Vol. 115. No 4. P. 508–517.

### Литература

1. *Дударь С.С., Свешникова Е.Б., Ермолаев В.Л.* Перенос энергии от комплексов Eu(III) и Tb(III) к красителям в их смешанных наноструктурах. I // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 104. № 2. С. 262–271.
2. *Свешникова Е.Б., Дударь С.С., Миронов Л.Ю., Ермолаев В.Л.* Особенности вхождения кумарина-30 в наночастицы из комплексов металлов и интенсивность его колюминесценции // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. № 2. С. 137–146.
3. *Wu Ch., Peng H., Jiang Y., McNeil J.* Energy transfer mediated fluorescence from blended conjugated polymer nanoparticles // Journal of Physical Chemistry B. 2006. Vol. 110. P. 14148–14154.



**Некрасова Яна Андреевна**  
Факультет фотоники и оптоинформатики  
Кафедра оптоинформационных технологий и материалов  
E-mail: [nekrasova@oi.ifmo.ru](mailto:nekrasova@oi.ifmo.ru)

## НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ЛЮМИНОФОРЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ИОНАМИ РЕДКОЙ ЗЕМЛИ И ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ, ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЛОГО СВЕТА

Я.А. Некрасова

Научный руководитель – профессор Н.В. Никоноров

### Введение

На сегодняшний день большой проблемой является получение и расход электроэнергии. В основном трата энергии населением направлена на освещение квартир, офисов, помещений, улиц, подсветку зданий. По различным оценкам она составляет до 18–20 % всех затрат произведенной электроэнергии.

Наилучшими характеристиками среди источников света в настоящее время обладают белые светодиоды. Основной привлекательной чертой светодиодной технологии является принципиально более высокий по сравнению с альтернативными технологическими решениями уровень светоотдачи (свыше 100 лм/Вт), что способно привести к значительным экономическим и социальным эффектам. Энергопотребление у них приблизительно на 50 % меньше, чем у люминесцентных ламп, а срок службы в среднем в 100 раз больше, чем у ламп накаливания, и в 5–10 раз больше, чем у люминесцентных ламп [1].

Основные направления развития светодиодной промышленности подразумевают разработку материалов с принципиально новыми свойствами и манипулирование их

наноразмерными компонентами для улучшения индекса цветопередачи CRI светоизлучающих диодов (СИД), основанных на преобразовании излучения синего диода. Важной задачей является разработка и изготовление красных люминофоров с низкой стоимостью, высокими химической стойкостью и эффективностью преобразования. Добавление таких материалов к белым СИД, созданным по существующим технологиям, позволит перемещаться по цветовой диаграмме в сторону более теплых значений цветовых температур.

Одними из перспективных материалов для таких люминофоров являются оксифторидные стекла и стеклокерамики, активированные ионами марганца и европия. Однако для получения заданных свойств необходимо оптимизировать параметры стеклокерамик по размеру и объему кристаллической фазы. Для оценки «спектрального качества» (совпадения со спектром солнечного излучения) используется такая характеристика, как цветовая температура.

## Методы исследования

### Синтез стекла

В работе исследовались оксифторидные стекла системы 5 мол. % метафосфата бария – 95 мол. %  $\text{MgPbCa}(\text{Ba})\text{SrAl}_2\text{F}_{14}$ , в качестве активаторов вводились  $\text{MnF}_2$  и  $\text{EuF}_3$  за счет эквимольного замещения  $\text{BaF}_2$  и  $\text{AlF}_3$ , соответственно. Концентрация  $\text{EuF}_3$  составляет 0–3 мол. %, концентрация  $\text{MnF}_2$  1–20 мол. % (при одновременном введении  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  в концентрации 0,2 мол. %).

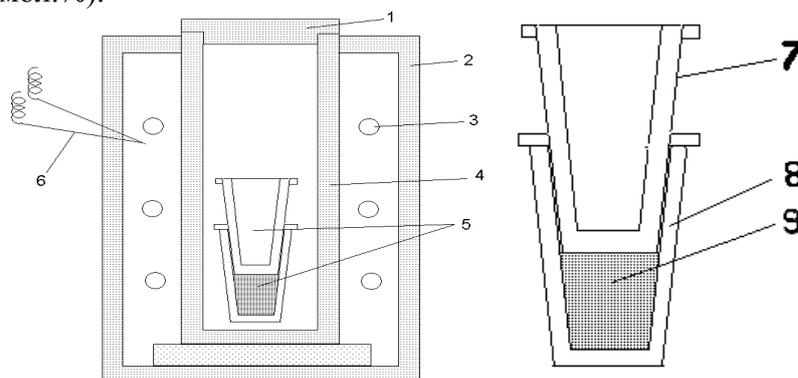


Рис. 1. Схема электрической печи и стеклоглеродного варочного комплекта по схеме «тигель в тигель»: 1 – корундовая крышка; 2 – корпус; 3 – карборундовые нагреватели; 4 – керамический защитный стакан; 5 – варочный комплект; 6 – термопара; 7 – тигель-крышка; 8 – варочный тигель; 9 – расплав стекла

Синтез стекол проводился в электрической лабораторной печи с силитовыми нагревателями, обеспечивающими нагрев рабочей зоны до 1450 °С. Синтез стекол осуществляется в воздушной или аргоновой атмосфере при температуре 950 °С в стеклоглеродном варочном комплекте по схеме «тигель в тигель» (рис. 1).

Тигель с шихтой помещается в разогретую электрическую печь и выдерживается в течение 30–60 мин.

Готовая стекломасса отливается на охлажденную стеклоглеродную пластину или переносится в печь отжига непосредственно в стеклоглеродном тигле для получения объемного образца. После того, как стекла перешли в твердое состояние, они помещаются в муфельную печь отжига. По данным дифференциального термического анализа были определены температура снятия термических напряжений, а также режимы вторичной термообработки. Оптимальный режим термообработки: при 520 °С в течение 30 мин.

### Спектрально-люминесцентные свойства

В работе измерение спектров поглощения проводилось на спектрофотометре Lambda 900 (Perkin Elmer) (рис. 2). Спектры поглощения были измерены в диапазоне (300–800 нм) с шагом 0,1 нм, время интеграции 0,2 с.



Рис. 2. Спектрофотометр Lambda 900 (Perkin Elmer)

Исследование люминесцентных свойств проходило в три этапа:

1. измерение спектров люминесценции при возбуждении различными типами источников излучения:

– импульсный лазер LS-2131M (Lotis ТП) с приставкой-преобразователем излучения HG-T (355 нм);

– непрерывный лазерный модуль с диодной накачкой – твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой LS-2-N-457-1000 (457 нм);

– белые светодиоды с различной цветовой температурой (например, 9500 К и 7000 К).

Спектральная чувствительность приемника определена при помощи калибровочной лампы, проведена нормировка полученных спектров по кривой чувствительности.

2. определение времени послесвечения полученных образцов люминофоров.

3. измерение значения квантового выхода люминесценции.

Для исследования люминесцентных свойств полученных материалов была использована стандартная схема измерения люминесценции, представленная на рис. 3.

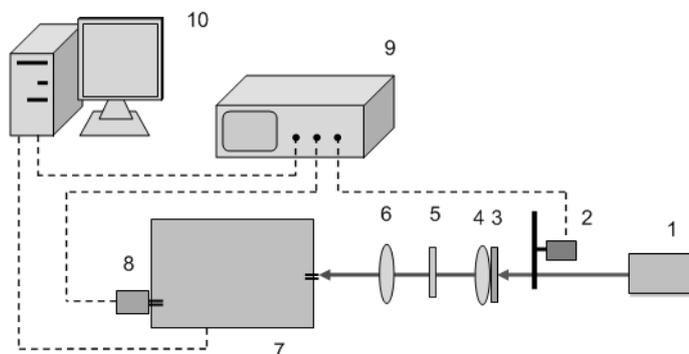


Рис. 3. Схема установки для регистрации спектров люминесценции

Возбуждение люминесценции осуществлялось с помощью различных источников излучения 1 белого и синего свечения. Излучение после прохождения через модулятор 2, фильтр 3 и собирающую линзу 4 попадает на образец 5, затем проходит через рассеивающую линзу 6 и, попадая на входную щель монохроматора 7, регистрируется на приемнике 8. Сигнал от приемника усиливается при помощи цифрового синхронного усилителя (модель SR 850 DSP) 9 и обрабатывается на компьютере 10.

Затем спектры люминесценции калибровались на спектр эталонного источника (вольфрамовая бенд-лампа). Значения относительных интенсивностей были использованы для определения цветовой температуры источника. Далее, изменяя составы и концентрации ионов активаторов, были определены условия получения источников белого света с заданными цветовыми температурами.

### Измерение значения квантового выхода люминесценции

Определение значения абсолютного квантового выхода было проведено с использованием волоконного спектрометра и интегрирующей сферы. Схема измерений приведена на рис. 4.

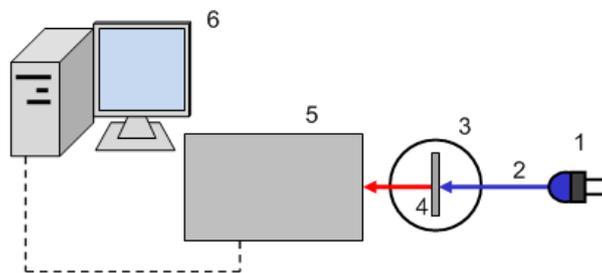


Рис. 4. Схема установки для измерений квантового выхода

Излучение калиброванного светодиодного источника 1 через волокно 2 направляется в интегрирующую сферу 3, где, возбужденная на образце 4, люминесценция регистрируется спектрофотометром 5. Полученные данные передаются и обрабатываются на компьютере 6.

Таким образом, в работе были исследованы образцы стекол и наностеклокерамик, активированные трехвалентным европием, марганцем, а также марганцем и европием. Проведено сравнение данных сред с целью определения материала оптимального для создания энергоэффективных источников белого света.

### Результаты проекта

В ходе работы были исследованы спектрально-люминесцентные свойства стекол и наностеклокерамик, активированные трехвалентным европием (1–3 мол. %), а также стекол, активированных ионами двухвалентного марганца в концентрациях 2, 5, 10, 15 и 20 мол. %, при введении  $\text{EuF}_3$  в концентрации 0,2 %.

На рис. 5 представлен характерный спектр поглощения трехвалентного европия в оксифторидном стекле.

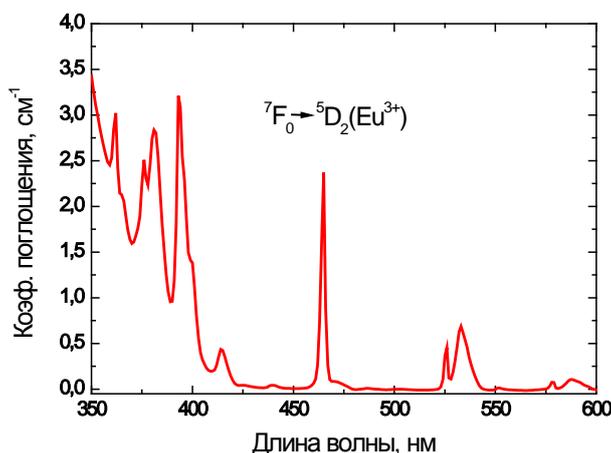


Рис. 5. Спектр поглощения европия

Видно, что существует интенсивная полоса поглощения с максимумом около 465 нм, более точно совпадающая с излучением синего диода, что позволяет осуществлять накачку на 465 нм.

На (рис. 6) представлен спектр поглощения марганца и европия в оксифторидном стекле, на котором отмечены основные энергетические переходы. По литературным данным [2] полосы поглощения на 393, 400 и 413 нм соответствуют следующим энергетическим переходам ионов марганца:  ${}^6A_1({}^6S) \rightarrow {}^4T_2({}^4D)$ ,  ${}^6A_1({}^6S) \rightarrow E({}^4G)$  и  ${}^6A_1({}^6S) \rightarrow {}^4T_2({}^4G)$ , соответственно. Поглощение  $\text{Mn}^{2+}$  в области 450–465 нм отсутствует, поэтому в систему вводят ионы  $\text{Eu}^{3+}$  с полосой на 465 нм ( ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_2$ ). Накачка такой системы на длине волны

в области 450–465 нм становится возможной за счет передачи энергии с уровня  $^5D_2$  европия на уровень  $^4T_2(^4G)$  марганца. На рис. 7 представлены спектры поглощения для всего исследуемого концентрационного ряда.

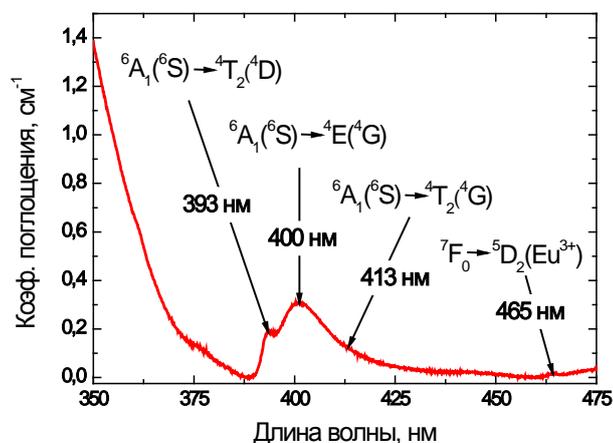


Рис. 6. Спектр поглощения ионов  $Mn^{2+}$  и  $Eu^{3+}$

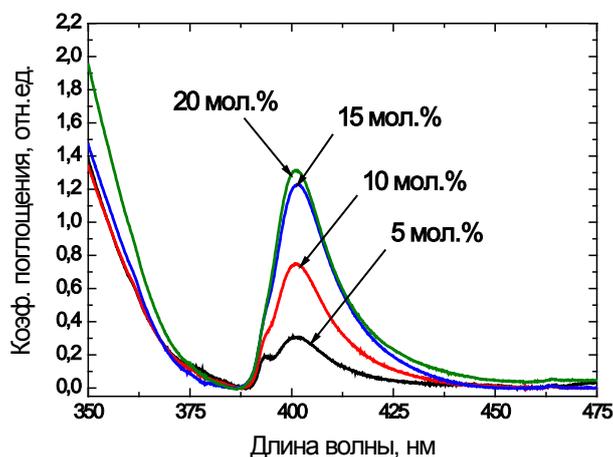


Рис. 7. Зависимость спектров поглощения образцов от концентрации  $MnF_2$

При изменении концентрации с 5 до 20 мол. % наблюдается рост значения коэффициента поглощения марганца на длине волны 400 нм, что позволяет более эффективно поглощать энергию от диода накачки.

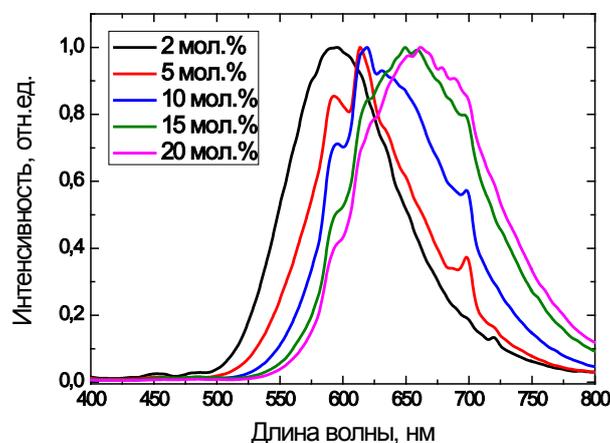


Рис. 8. Спектры люминесценции образцов с различными концентрациями  $MnF_2$  ( $\lambda_{возб} = 355$  нм)

На спектре люминесценции (рис. 8) наблюдаются полосы, связанные с излучением как ионов двухвалентного марганца ( $^4T_1(^4G) \rightarrow ^6A_1(^6S)$ ), так и трехвалентного европия ( $^7F_1 \rightarrow ^5D_0$ )

(595 нм),  ${}^7F_2 \rightarrow {}^5D_0$  (618 нм) и  ${}^7F_4 \rightarrow {}^5D_0$  (700 нм)). При увеличении концентрации марганца до 20 мол. % выделить полосы европия становится практически невозможно, поскольку они перекрыты широкой полосой марганца. Увеличение концентрации ионов-активаторов приводит к смещению максимума широкого пика люминесценции в более длинноволновую область. Это может быть связано с изменением действия поля лигандов на ионы  $Mn^{2+}$ .

Распад люминесценции происходит по экспоненциальному закону. В результате концентрационного тушения при увеличении содержания ионов  $Mn^{2+}$  в составе оксифторидных стекол с 5 до 20 мол. % наблюдается уменьшение времени жизни люминесценции с 17,7 до 7,3 мс.

### Тестирование новых люминофоров, определение квантового выхода и расчет значений цветовых температур

В данном разделе проведено сравнение люминофоров на основе марганца и европия и приведены результаты расчетов изменения цветовых температур белых диодов и индекса цветопередачи (CRI) с использованием дополнительного красного люминофора. На рис. 9 представлен спектр белого диода и спектры белого диода с добавлением красного люминофора, содержащего различную концентрацию марганца.

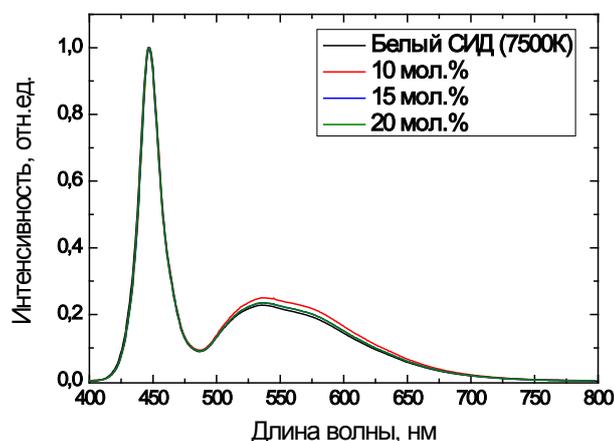


Рис. 9. Спектры люминесценции образцов с различными концентрациями  $MnF_2$

Как видно на рис. 9 добавление стекла, активированного марганцем, приводит к небольшому возрастанию относительной интенсивности в желто-красной области спектра. Максимальные изменения наблюдаются для образца с максимальной концентрацией марганца 10 мол. %. Такие малые изменения связаны с неэффективным поглощением излучения накачки. Далее рассмотрим аналогичные зависимости для образцов с европием (рис. 10).

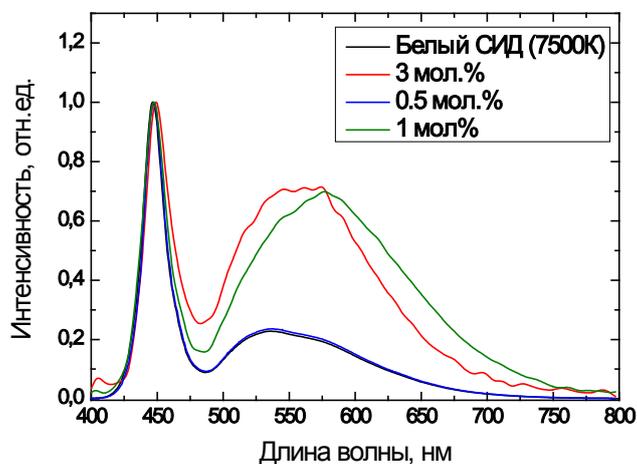


Рис. 10. Спектры люминесценции образцов с различными концентрациями  $EuF_3$

Стеклокерамики, активированные 1 и 3 мол. % европия, обладают максимальными изменениями спектров. Спектр получает дополнительные полосы в красной области, что

увеличивает ширину спектра люминофора с 97 до 117 нм для концентрации ионов-активаторов 1 мол. %.

На рис. 11 и 12 представлены спектры диода при добавлении люминофоров, активированных европием и марганцем, при возбуждении белыми диодами с температурой 7500 и 9500 К соответственно.

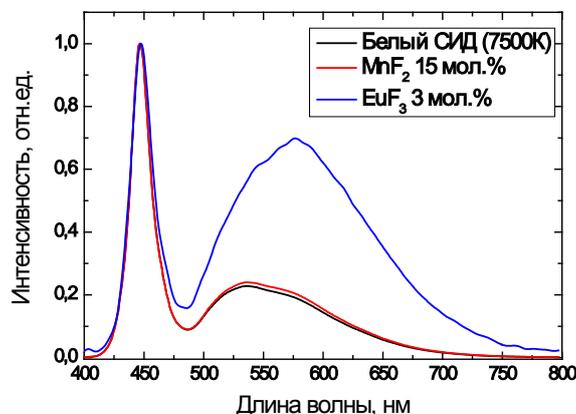


Рис. 11. Спектры люминесценции образцов, активированных  $MnF_2$  и  $EuF_3$

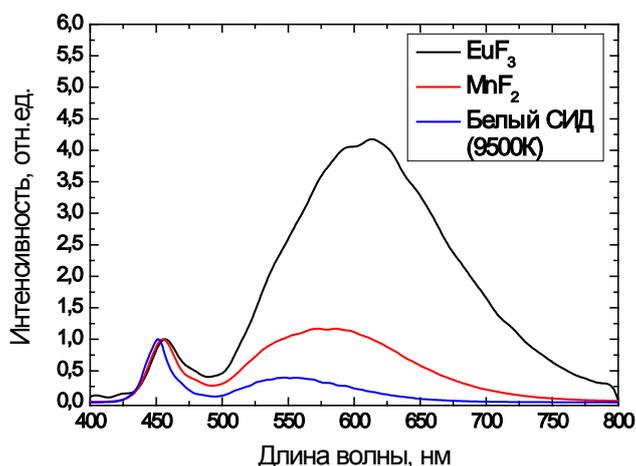
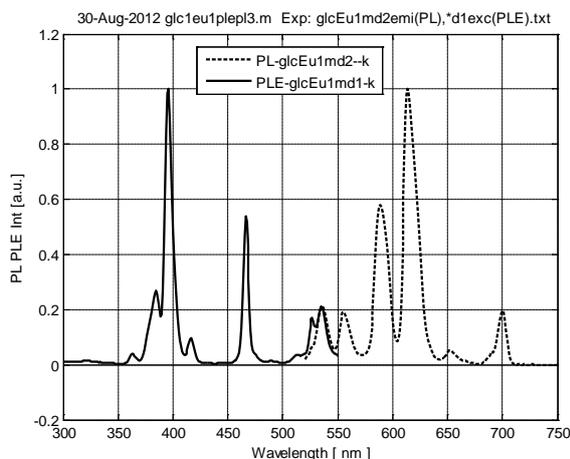
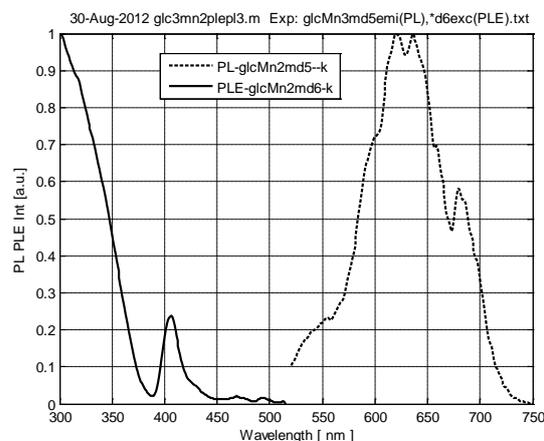


Рис. 12. Спектры люминесценции образцов с различными концентрациями  $MnF_2$  и  $EuF_3$



а



б

Рис. 13. Спектры возбуждения и люминесценции образцов, активированных:  
а –  $EuF_3$  – 1 мол. % (А); б –  $MnF_2$  – 2 мол. % (Б).

Квантовый выход образцов составил 34 и 21 %, соответственно

Введение красной компоненты позволяет сместить суммарный спектр излучения в сторону больших значений длин волн. Например, добавление люминофора, активированного

$\text{EuF}_3$ , смещает максимум полосы с 550 до 620 нм (рис. 13). По спектрам излучения при возбуждении СИД с цветовой температурой 9500 К были оценены значения цветовой температуры и индекса цветопередачи (Табл. 1).

Таблица 1

Оптические характеристики полученных светодиодов (CIE – координаты цветового пространства, CCT – цветовая температура, CRI – индекс цветопередачи)

СИД	CIE (x, y)	CCT (К)	CRI (Ra)
Синий диод	0,1633; 0,0436	-	-
YAG:Ce <sup>3+</sup>	0,2792; 0,2984	9540	65
EuF <sub>3</sub> (1 мол.%)	0,4292; 0,3694	2830	75
MnF <sub>2</sub> (2 мол.%)	0,3918; 0,3466	3450	81

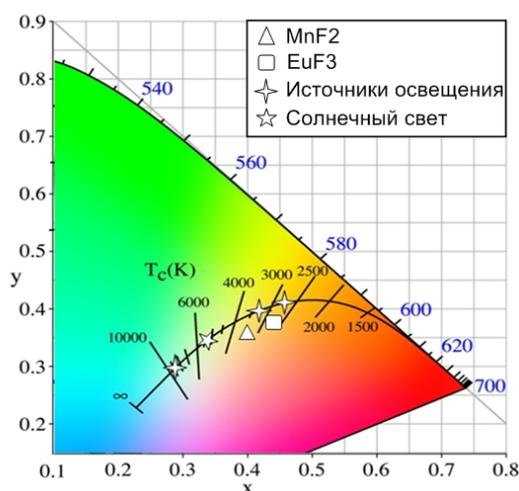


Рис. 14. Цветовая диаграмма МКО (1931). Источники освещения (по возрастанию цветовой температуры): лампа накаливания, люминесцентная лампа, светодиод «холодного» белого света

По полученным данным можно сделать вывод, что самыми оптимальными характеристиками обладает люминофор, активированный ионами марганца при одновременном введении фторида европия. Введение такого материала позволило уменьшить значение цветовой температуры с 9500 до 3500 К (рис. 14), а также увеличить индекс цветопередачи с 65 до 81 Ra. Квантовый выход в таком материале составил 21 %. Дальнейшие исследования будут направлены на увеличение данного показателя.

## Выводы

1. Синтезированы составы стекол и наностеклокерамик, на основе оксифторидных и фторфосфатных матриц.

2. Исследовано влияние концентрации на спектрально-люминесцентные свойства редкоземельных ионов и ионов переходных металлов. Определены длины волн полосы возбуждения и люминесценции, цветовая температура. Показано, что комбинация редкоземельных ионов (церия и европия) с ионами переходных металлов (марганец) сдвигает полосу люминесценции в красный спектральный диапазон. Это позволило в сочетании с синим излучением кристалла-чипа получить белый свет с цветовой температурой, соответствующей «теплому» белому свету, который наиболее комфортен для внутреннего освещения зданий (офисных и жилых помещений) по сравнению с «холодным» белым светом от светодиодов на основе люминофора ИАГ:Ce<sup>3+</sup>.

3. На основе этого материала возможно создание и модернизация существующих долгоживущих энергоэффективных источников белого света с суммарным спектром излучения, приближенным к солнечному. Данные источники могут найти применение

в системах общего и декоративного освещения, а также в качестве подсветки жидкокристаллических дисплеев и мониторов. Белые светодиоды с высоким значением индекса цветопередачи могут применяться в медицинской технике.

### Публикации

1. Асеев В.А., Колобкова Е.В., Некрасова Я.А., Никоноров Н.В., Рохмин А.С. Люминесценция марганца во фторфосфатных стеклах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 36–39.
2. Некрасова Я.А. Неорганические красные люминофоры для белых светодиодов // Аннотированный сборник научно-исследовательских работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 227–229.
3. Некрасова Я.А. Стеклокристаллические люминофоры для белых светодиодов, активированные редкоземельными ионами и ионами переходных металлов // Сб. тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых (10–13 апреля 2012 г., Санкт-Петербург, Россия). Вып. 2. СПб., 2012. С. 343.
4. Некрасова Я.А., Асеев В.А., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В. Активированные редкоземельными ионами и ионами переходных металлов неорганические люминофоры // Конференция молодых ученых и специалистов «Будущее оптики – 2012» (2–4 апреля 2012 г.): Сб. трудов конференции. СПб., 2012. С. 12–14.
5. Асеев В.А., Некрасова Я.А., Никоноров Н.В., Колобкова Е.В., Усов О.А., Нащечкин А.В., Образцов П.А. Оптические свойства люминофоров на основе фторидных стеклокерамик // Сб. трудов VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО-2012) (15–19 октября 2012 г., Санкт-Петербург, Россия). СПб., 2012. С. 275–278.
6. Aseev V., Nekrasova Y., Nikonorov N.V., Kolobkova E., Usov O., Nashchekin A., Obratsov P., Konnikov S. Transparent nano-glassceramics doped with rare earth and transition ions for LED // 15<sup>th</sup> International Conference “Laser Optics 2012” (25–29 June 2012, Saint Petersburg, Russia): Technical program. St. Petersburg, 2012. P. 25.
7. Aseev V.A., Nekrasova Y.A., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Usov O.A., Nashchekin A.V., Obratsov P.A., Konnikov S.G. Novel transparent nano-glassceramics doped with rare earth ions with enhanced light emission for LED // Technical Digest of 8<sup>th</sup> International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF’12) (2–5 July 2012, St. Petersburg, Russia). St. Petersburg, 2012. P. 49–50.
8. Aseev V.A., Kolobkova E.V., Nekrasova Y.A., Nikonorov N.V., Usov O.A. Inorganic red phosphors for white light-emitting diodes based on RE and TM activated nano-glassceramics // The 3<sup>rd</sup> International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices (ICOM-2012) (3–6 September 2012, Belgrade, Serbia): Book of abstracts. Belgrade, 2012. P. 250.
9. Aseev V.A., Nekrasova Y.A., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Usov O.A., Nashchekin A.V., Obratsov P.A., Konnikov S.G. Red phosphor based on nanoglassceramics doped with Eu and Mn // 13<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids (XIII PNCS) (16–20 September 2012, Yichang, China): Conference abstracts. Yichang, 2012. P. 87.
10. Aseev V.A., Nekrasova Y.A., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Usov O.A., Nashchekin A.V., Obratsov P.A., Konnikov S.G. Europium and manganese doped nanoglassceramics for white emitting diodes // 10<sup>th</sup> International Symposium on Crystallization in Glasses and Liquids (23–26 September 2012, Goslar, Germany): Programme and Abstracts. Goslar, 2012. P. 23.
11. Aseev V.A., Nekrasova Ya.A., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Usov O.A., Nashchekin A.V. Optical properties of red emitting phosphors based on Eu or Mn doped fluoride glass ceramics // 21<sup>st</sup> International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”: Abstracts (24–28 June 2013, Saint Petersburg, Russia). St. Petersburg, 2013. P. 29–30.
12. Aseev V.A., Kolobkova E.V., Nekrasova Y.A., Nikonorov N.V., Usov O.A. Fluorine phosphate glasses doped with europium and manganese ions // Proceeding of 12<sup>th</sup> International conference on structure of non crystalline materials (7–12 July 2013, Riva del Garda, Italy). Riva del Garda, 2013. P. 183.

13. Nekrasova Y.A., Aseev V.A., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Usov O.A., Nashchekin A.V. Red Emitting Phosphors Doped with Mn and Eu Ions for pc-WLEDs // Proceedings of the International Conference Nanomaterials (16–21 September 2013, Alushta, the Crimea, Ukraine): Applications and Properties. 2013. Vol. 2. No 4. – 2 p.

## Литература

1. Дорожная карта «Использование нанотехнологий в производстве светодиодов». М., 2010. – 205 с.
2. Шамиурин А.В., Маскалюк Л.Г., Ретин А.В. Люминофоры на основе твердых растворов фосфатов цинка и магния, активированные ионами марганца // Труды Одесского политехнического университета. Вып. 3. Одесса, 1999. С. 230–232.



**Пантюшина Екатерина Николаевна**  
Факультет оптико-информационных систем и технологий  
Кафедра оптико-электронных приборов и систем  
E-mail: [enkuleshova@mail.ru](mailto:enkuleshova@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УДЛИНЕНИЯ ШТОКА ПОРШНЯ ВО ВРЕМЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ КЛАПАНОВ

Е.Н. Пантюшина

Научный руководитель – доцент А.А. Горбачев

### Введение

Цилиндро-поршневые сборки используются в различных отраслях промышленности, например, нефтегазовой, химической, строительной и пр. Продолжительная работа поршня в подобных сборках способствует изменению толщины штока, на котором он крепится. Такая ситуация может привести к разрыву штока и, как следствие, поломке цилиндра. Уменьшить риск поломки можно, владея информацией о сроке службы цилиндрической поршневой сборки, для чего проводятся ресурсные испытания клапанов. Обычно поршни располагаются в труднодоступных местах и контролировать их работу контактным способом во время возвратно-поступательного движения не представляется возможным. В таких ситуациях применяют бесконтактный способ контроля подвижных элементов, который реализуют на базе оптико-электронных систем (ОЭС), работающих по анализу совокупности изображений объекта контроля. Разработка и исследование подобных систем является актуальной задачей в современном приборостроении.

В настоящее время известны многие разработчики ОЭС для контроля линейных перемещений, предлагающие многообразие вариантов подхода к решению этой задачи [1–4]. Все известные разработки можно разделить на две группы: с использованием волновой оптики или геометрической. Первые применяются довольно широко, но не позволяют в динамическом режиме обеспечить необходимый диапазон измерений перемещения поршня при сохранении высокой точности. Кроме того, при резких перемещениях поршня нельзя зафиксировать четкую интерференционную картину. Системы на основе геометрической оптики в основном позволяют определять величину перемещения в стационарном режиме, но обладают значительными габаритными размерами. После обзора существующих методов и средств используемых для бесконтактного контроля линейных перемещений, был сделан вывод об актуальности создания такой системы, которая бы применялась для контроля

параметров движения объектов, расположенных в труднодоступных местах и обладала ограниченными габаритами.

Основными задачами, решаемыми при создании такой системы, являются:

- возможность осуществления измерений в труднодоступных местах;
- достижение необходимой точности измерений, которая должна составлять десятые, а в некоторых случаях и сотые доли миллиметра (диапазон контролируемых поперечных перемещений поршневого механизма в цилиндрическом клапане при этом обычно составляет десятки миллиметров);
- ограниченные габаритные размеры и устойчивость к вибрациям.

Целью данной работы является разработка и исследование системы для контроля удлинения штока поршня во время ресурсных испытаний клапанов. Она должна измерять перемещение, скорость и ускорение при возвратно-поступательном движении поршня во время его работы без предварительной подготовки к измерениям.

Данное исследование призвано уменьшить погрешность оптико-электронных измерительных систем, предназначенных для проведения ресурсных испытаний клапанов, в частности, и для измерения перемещений объектов, в целом.

## Разработка измерительной системы без использования реперных меток

### Обзор и анализ возможных схем построения

Для определения уровня развития техники в данной области были проведены патентные исследования, которые показали, что имеющиеся разработки и способы, применяемые для контроля перемещения поршня в цилиндре клапана, можно разделить на два типа: интерференционные и реализуемые с помощью анализа последовательности изображений объекта контроля.

К первым относятся, например, патенты на изобретение [5, 6], ко вторым – патенты и заявки [7–11]. Недостатками известных способов и устройств являются:

- сложность юстировки из-за наличия большого количества элементов конструкции;
- повышенная чувствительность к вибрациям объекта, обусловленная применением интерференционного метода измерения;
- ограниченная функциональность, так как она позволяет определять только величину перемещения и только по одной координате.

Учитывая все эти недостатки, предложена обновленная и более эффективная схема измерений, которая позволяет увеличить скорость обработки изображений объекта контроля. На ее основе разработана ОЭС, позволяющая контролировать параметры линейного перемещения штока поршня по двум координатам, обладающая малыми габаритами и низкой погрешностью.

### Прототип измерительной системы

На кафедре ОЭПиС НИУ ИТМО была спроектирована ОЭС для осуществления динамических измерений возвратно-поступательного движения поршня в цилиндрическом клапане с использованием реперной метки [12]. Контроль процесса в разработанной ОЭС осуществляется с помощью видеоблока и реперной метки, жестко закрепленной на контролируемом поршне в его нерабочей зоне. Videobлок включает специальную осветительную систему, содержащую два инфракрасных светодиода, объектив и приемник оптического излучения (ПОИ). Принцип работы системы заключается в том, что реперная метка освещается двумя источниками излучения, расположенными симметрично относительно оптической оси объектива. Изображение источников формируется на ПОИ и передается в блок обработки, в качестве которого могут использоваться схемы с применением микроконтроллеров или программируемых логических интегральных схем, а также персональный компьютер. По двум соседним кадрам специально разработанное программное обеспечение вычисляет параметры перемещения поршня, такие как величину

перемещения, скорость и ускорение, и передает информацию на видеоконтрольное устройство. Блок питания вырабатывает необходимое напряжение для работы сенсора.

При разработке этой системы было рассмотрено три варианта схемы измерения: с использованием активных и пассивных реперных меток или – без них.

Активная реперная метка представляет собой источник излучения – полупроводниковый лазер или инфракрасный излучающий диод. Изображение источника строится на ПОИ. Напряжение питания можно подводить как от аккумуляторных батарей, так и по проводам. Ограниченные габаритные размеры активной реперной метки и использование аккумуляторных батарей приводит к усложнению конструкции самой метки. К тому же время работы источника излучения от аккумуляторных батарей мало по сравнению с общим циклом измерений. Использование активной реперной метки с проводами усложняет установку ее на поршень. Кроме этого, в процессе измерений провода могут переломиться, что не позволит зафиксировать положение поршня.

Использование пассивной реперной метки в виде тетраэдрического отражателя не целесообразно. Проведенные эксперименты показали, что создать на ПОИ освещенность, необходимую для фиксации перемещения поршня, с использованием подсветки невозможно. Реперная метка в виде металлического сферического отражателя при том же источнике излучения создает на ПОИ достаточную освещенность. Источник излучения в этом случае находится в камере. Отраженное от реперной метки излучение попадает через оптическую систему на ПОИ.

Стоит отметить, что при использовании метки в виде сферического отражателя необходимо учитывать возникающую при этом погрешность, которая обусловлена тем, что метка в данном случае работает подобно выпуклому сферическому зеркалу. Необходимо знать величину влияния сферического отражателя на погрешность измерения при перемещении поршня. Исходя из основных соотношений геометрической оптики для сферического выпуклого зеркала, была определена погрешность перемещения метки в зависимости от конструктивных параметров системы [13].

На данный момент реализован лишь вариант ОЭС с использованием реперной метки. Предварительные эксперименты показали, что на процесс измерения параметров перемещения поршня без реперной метки влияют такие внешние факторы, как смазочные материалы и инородные частицы, которые постоянно меняют структуру поверхности поршня. В данной работе планируется разработать и исследовать новый алгоритм получения информации о параметрах перемещения поршня без использования реперной метки, который позволит проводить контроль без предварительной подготовки поршня и значительно расширит сферу применения подобной системы в промышленности.

Разработан макет ОЭС (рис. 1) без использования реперных меток, основанный на анализе совокупности изображений объекта контроля. Он позволяет определять величину перемещения, скорость и ускорение объекта с помощью технологической выемки на поверхности нерабочей части поршня.

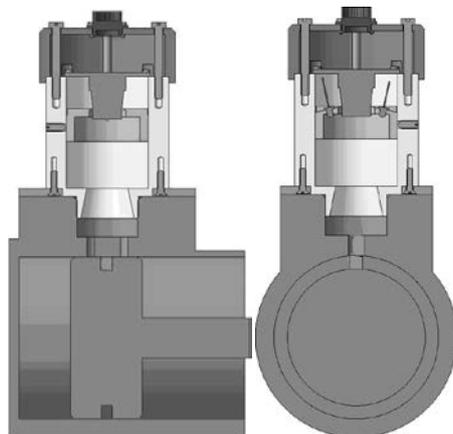


Рис. 1. Внешний вид ОЭС для контроля линейных периодических перемещений поршня в цилиндре клапана

Для исследования ОЭС на базе созданного макета был собран лабораторный стенд (рис. 2), в котором использованы: в качестве ПОИ – КМОП матрица высокого разрешения с плавающим затвором OV5610 фирмы OmniVision; в качестве источников излучения два инфракрасных излучающих диода; моторизированная подвижка MT160-300 фирмы Standa, имитирующая перемещающийся поршень. Программное обеспечение для управления работой стенда было создано в среде разработки LabVIEW и предназначено для обработки изображений с целью определения параметров перемещения метки.

Разработанный лабораторный стенд позволяет определять такие параметры движения штока поршня, как величину перемещения, скорость и ускорение без его предварительной подготовки (при отсутствии реперной метки).

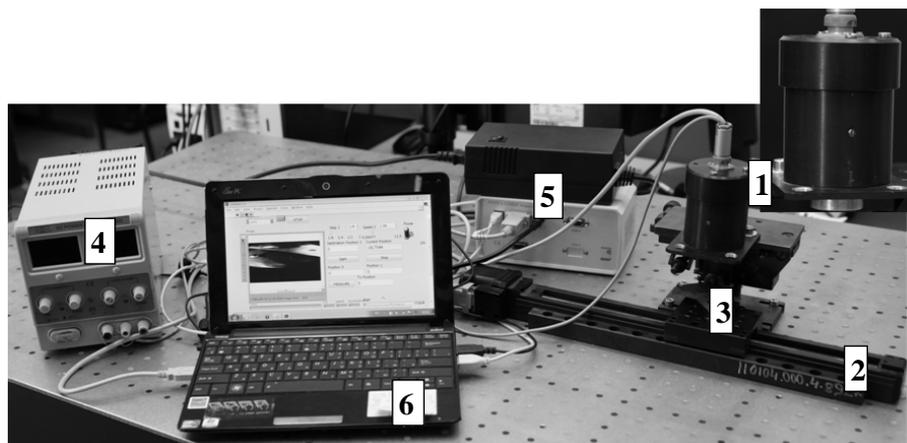


Рис. 2. Лабораторный стенд: 1 – видеоблок; 2 – моторизированная подвижка; 3 – имитация поверхности поршня; 4 – блок питания источников излучения; 5 – блок питания подвижки; 6 – блок управления и обработки или компьютер

При выборе ПОИ и разработке программного обеспечения системы были проанализированы три практических сценария обработки последовательности изображений, предназначенных для получения информации о параметрах движения объекта в схемах без использования реперной метки. Это анализ классической трехкадровой последовательности и, реже применяемой, двухкадровой, полученной с помощью ПОИ глобального (Global shutter) или бегающего затвора (Rolling Shutter). При этом время экспозиции камеры остается постоянным [14].

Процесс обработки трехкадровой последовательности подразумевает определение координат изображения объекта в каждом кадре и непрерывное их сравнение. Разность координат изображения объекта в первом и во втором кадрах определяют скорость перемещения в первый момент времени. По второму и третьему кадру определяют скорость перемещения во второй момент времени, а по их разнице – ускорение объекта. Время экспозиции задают в процессе измерения.

Процесс обработки двухкадровой последовательности, полученной с помощью ПОИ глобального затвора базируется на определении смаза изображения и подразумевает анализ параметров перемещения объекта за время одного кадра. Величина смаза напрямую зависит от скорости движения объекта. Таким образом, скорость можно оценить, измерив величину смаза в одном кадре, а ускорение – сравнивая скорости в двух кадрах.

Процесс обработки двухкадровой последовательности, полученной с помощью ПОИ с бегающим затвором, также базируется на определении длины смаза. Однако в этом случае она зависит от частоты и размера кадров.

Для осуществления экспериментов в среде программирования LabView была разработана программа, позволяющая управлять позиционной подвижкой и измерять положение объекта. Для ее работы необходимо задать три положения объекта – два крайних и центральное. Все измеренные значения записываются в текстовый файл.

### Компьютерная модель измерительной системы

Для исследования алгоритмов обработки информации в разработанной ОЭС была реализована математическая модель в среде Matlab, позволяющая генерировать изображение, пространственно его фильтровать и вносить геометрические искажения.

На первом этапе создается двумерное случайное распределение с характеристиками, близкими к белому шуму. На втором – изображение пространственно фильтруется двумерным низкочастотным фильтром. Далее, в зависимости от задаваемого положения штока поршня выбирается определенная область, которая геометрически искажается для имитации aberrаций оптической системы ОЭС, а полученное изображение (рис. 3) является исходным для алгоритма обработки изображений.

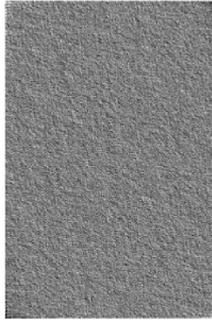


Рис.3. Результат моделирования в Matlab

Такое моделирование позволяет проверить работоспособность алгоритмов обработки информации в системе для разных типов поверхностей штока поршня, а также для различных оптических систем.

Для проведения комплексных математических исследований разработанной ОЭС без использования реперной метки было осуществлено моделирование процесса измерения в среде Zemax, позволяющий производить оптические расчеты как последовательных систем, так и систем с непоследовательным ходом лучей. Вторым вариантом является более предпочтительным, так как в нем учитываются такие оптические явления, как рассеяние, деление лучей, множественные переотражения, эффекты интерференции и дифракции; лучи последовательно трассируются, что позволяет с высокой точностью и близко к реальности моделировать изображение объекта на модели ПОИ; все модели оптических узлов и компонентов представляются в трехмерном виде.

Кроме того, выбранная среда моделирования позволяет воссоздать такие сложные источники излучения как светодиоды, полностью учитывая индикатрису излучения, внутренние отражения в стеклянном теле, рассеяние на неполированных гранях.

### Общая модель ОЭС

Модель в Zemax состоит из поверхности, двух диодов, оптической системы и ПОИ. Рассмотрим подробнее модель каждого элемента.

Модель поверхности штока поршня представляет собой ламбертовский отражатель с шероховатостью  $Rz$  50, содержащий поперечную канавку глубиной 0,5 мм. Радиус поверхности вдоль оси перемещения составляет 50 мм.

В качестве источников излучения используются две одинаковые модели диода со следующими характеристиками: астигматизм – 0,05; угол излучения по  $X$  (дивергенция) – 10; угол излучения по  $Y$  (дивергенция) – 10; интенсивность излучения распределена по закону Гаусса.

Оптическая система – объектив № 45205 фирмы Edmund Optics, состоящий из двух склеенных линз, с фокусным расстоянием 8 мм и относительным отверстием  $1/2$ .

Марки стекол определены в каталоге «SCHOTT».

Модель ПОИ представляет собой матричное поле размерами  $2 \times 2$  мм, и  $512 \times 512$  пикселей. ПОИ поглощает все падающее излучение.

### Результаты моделирования

На более ранних этапах было проведено моделирование ОЭС с использованием реперной метки в виде сферического отражателя [14]. Для проверки экспериментальных результатов этой ОЭС с помощью модели были подобраны изображения при различном положении отражателя, и обработаны тем же алгоритмом, что и изображения, полученные в ходе эксперимента. Таким образом, была получена статическая характеристика модели ОЭС с использованием реперной метки (рис. 4).

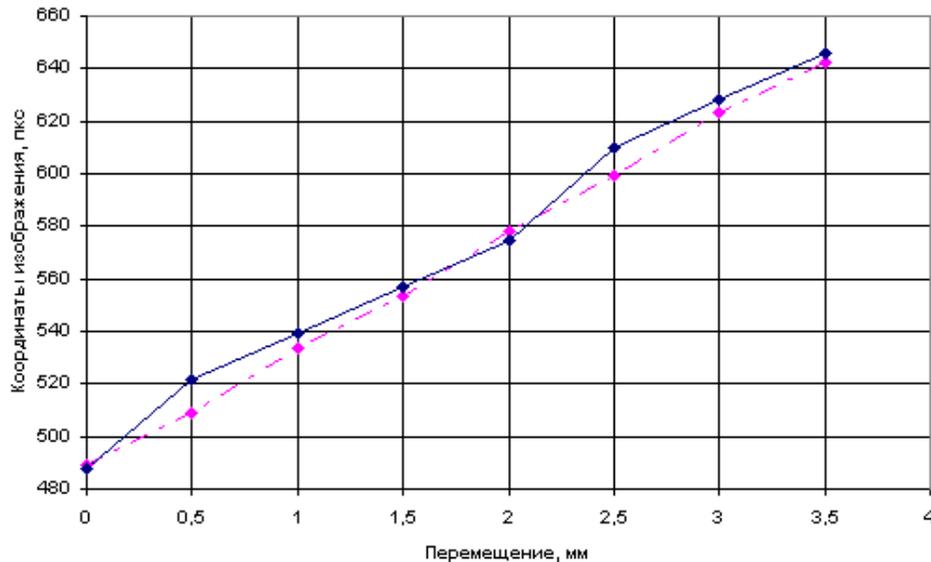


Рис. 4. Результаты моделирования. Статическая характеристика ОЭС: с отражающим элементом в виде сферы (сплошная линия); без использования реперной метки (пунктирная линия)

Из рис. 4 следует, что статическая характеристика при работе системы без отражателя более линейна вследствие отсутствия искажений, возникающих при отражении от сферической поверхности реперной метки.

Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований прототипа измерительной системы

#### Алгоритм определения параметров движения объекта в ОЭС

Исследуемая система определяет текущее положение штока поршня на основе анализа его изображения в двух известных моментах времени. Для каждого изображения выполняется коррекция геометрических искажений, обусловленных абберациями оптической системы, затем выполняется преобразование Фурье, вычисляются его производные, далее – обратное преобразование Фурье. На полученных изображениях вычисляются энергетические центры масс. Расстояние между ними является перемещением изображения штока поршня, на основе чего вычисляются параметры его движения.

#### Результаты сравнения компьютерного моделирования и экспериментальных исследований прототипа измерительной системы

Было проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований прототипа ОЭС без использования реперной метки. В частности, были получены статические характеристики для компьютерной модели и экспериментального образца. Максимальное расхождение между ними не превысило 0,1 мм. Данную величину следует признать удовлетворительной и говорящей о хорошем схождении экспериментов с компьютерной моделью.

### Результаты сравнения экспериментальных исследований прототипа с использованием реперной метки и без нее

На разработанном лабораторном стенде была проведена серия экспериментов с прототипом ОЭС с использованием реперной метки и без нее. На рис. 5 приведены результаты экспериментов.

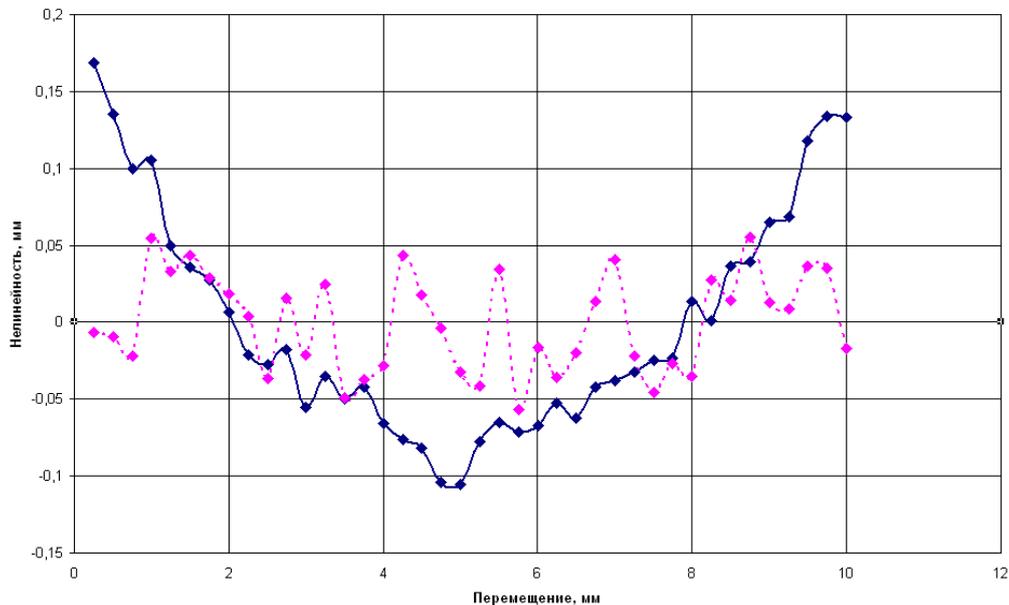


Рис. 5. Отклонение от линейности статической характеристики ОЭС: с отражающим элементом в виде сферы (сплошная линия); без использования реперной метки (пунктирная линия)

Из рисунка видно, что отклонение от линейности при использовании реперной метки в виде сферического отражателя значительно превышает эту же величину для случая без использования реперной метки.

### Основные погрешности

В результате проведенного анализа было выявлено, что в ОЭС измерения параметров перемещения поршня в клапане при работе на лабораторном стенде возникают следующие виды погрешностей: шумы ПОИ; погрешность определения энергетического центра тяжести; погрешность, обусловленная использованием электрической подвижки.

На основе анализа погрешностей основной влияющей величиной признано отношение сигнал/шум на матричном ПОИ. Эта зависимость приведена на рис. 6.



Рис. 6. Зависимость СКО определения величины перемещения штока клапана величиной в 1 мм от отношения сигнал/шум

## Заключение

В процессе работы над проектом был проведен обзор известных схем построения измерительной системы без использования реперных меток, выявлены их достоинства и недостатки. По результатам обзора предложена обновленная и более эффективная схема измерений с целью увеличения скорости обработки изображений и измерительной информации.

В ходе выполнения настоящего проекта разработан новый алгоритм обработки информации в ОЭС без использования реперных меток, основанный на анализе изображений поверхности поршня. Для проверки его эффективности было выполнено математическое и компьютерное моделирование ОЭС для измерения периодических перемещений объекта с помощью программных пакетов Matlab и Zemax, а также с помощью методов цифровой обработки изображений. Это позволило усовершенствовать ранее разработанную модель компенсации погрешностей, возникающих в процессе измерения. Полученные результаты исследований проверены на лабораторном стенде, созданном на основе лабораторной базы Ресурсного центра НИУ ИТМО.

Результаты моделирования будут применены для уточнения поправочных коэффициентов и общей калибровки системы, что позволит повысить точность определения параметров линейного перемещения контролируемых объектов, например, при проведении ресурсных испытаний.

Таким образом, в данной работе выполнено:

- обзор и анализ возможных схем построения измерительной системы без использования реперных меток;
- построение компьютерной модели этой системы;
- экспериментальные исследования прототипа системы на лабораторном стенде;
- сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований прототипа;
- полученные результаты реализованы в некоторых разработках кафедры ОЭПиС в области контроля перемещений объектов.

При этом были использованы следующие методы исследования:

- аналитические и численные методы геометрической оптики;
- методы цифровой обработки изображений (в среде графического программирования Lab VIEW);
- математическое и компьютерное моделирование с применением персональных электронно-вычислительных машин (в средах Matlab и Zemax);
- экспериментальные исследования с помощью лабораторного стенда с использованием контрольно-юстировочной аппаратуры.

Результаты исследований, полученные в ходе выполнения данного проекта, могут применяться во всех отраслях промышленности, машинном зрении и, в частности, могут быть положены в основу создания лабораторной работы по изучению методов обработки изображения для определения параметров движения перемещающихся объектов. Разрабатываемая измерительная система и исследуемые способы получения информации о параметрах перемещений объектов позволят с высокой точностью и надежностью контролировать процессы движения объектов в труднодоступных местах без специальной подготовки объекта к измерениям. При этом необходимо будет произвести минимальную адаптацию ОЭС, обусловленную особенностями поставленной задачи измерений.

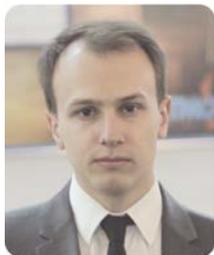
## Публикации

1. *Pantiushina E.N., Gorbachev A.A.* Imaging sensor for monitoring of the piston mechanism in cylindrical valves // SPIE Proceedings. 2013. Vol. 8788. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII (May 13, 2013). – 9 p.

2. Пантюшина Е.Н. Компьютерная модель системы контроля поперечных перемещений объекта // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 149–151.
3. Горбачев А.А., Кулешова Е.Н. (после брака Пантюшина), Лашманов О.Ю. Моделирование погрешности измерения линейных перемещений объекта в оптико-электронной системе // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика-2012» (15–19 октября 2012 г.). Т. 2. СПб., 2012. С. 112–115.
4. Кортаев В.В., Тимофеев А.Н., Горбачев А.А., Пантюшин А.В., Алев А.М., Кулешова Е.Н. (после брака Пантюшина). Устройство для контроля деформаций протяженного объекта, патент на изобретение № 2445572, опубл. 20.03.2012.
5. Горбачев А.А., Пантюшин А.В., Лашманов О.Ю., Кулешова Е.Н. Измерение параметров движения объектов с помощью телевизионной камеры, свидетельство на программу для ЭВМ № 2012613939, опубл. 27.04.2012.
6. Горбачев А.А., Кулешова Е.Н. (после брака Пантюшина). Исследование влияния формы сферического отражателя на точность измерения перемещений поршня в цилиндре клапана // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 6 (70). С. 12–16.

## Литература

1. Анисимов А.Г., Кортаев В.В., Кулешова Е.Н. О возможности адаптации теории распределенных измерительных систем к оптико-электронным системам // Приборостроение. 2010. № 7. С. 86.
2. 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.
3. Van Yperen. Measuring method for determining the displacement of a mobile part of an actuator and device for applying the measuring method. European patent application EP 1 429 038 A1, priority date 10.12.2002.
4. Samuel E. Ebenstein. Non-contact method of obtaining dimensional information about a reference feature of an object. United States Patent US 5,319,567, date of patent Jun. 7, 1994.
5. Патент на изобретение РФ 2407988 «Оптическое устройство для измерения перемещений», опубл. 27.12.2010.
6. Патент на изобретение РФ 2343402 «Оптическое устройство для измерения перемещений поверхностей объектов контроля», опубл. 10.01.2009.
7. Заявка на изобретение WO 2009053812 «System for determining the position of a piston along its path of travel for a fluid-dynamic actuator», опубл. 30.04.2009.
8. Патент на изобретение EP 1429038 «Measurement method for determining the displacement of a movable part of an actuator and device for applying the measuring method», опубл. 16.06.2004.
9. Заявка на изобретение WO 2009112895 «Position sensing of a piston in a hydraulic cylinder using a photo image sensor», опубл. 17.09.2009.
10. Патент на изобретение РФ 2467336 «Устройство для измерения перемещения и устройство измерения скорости», опубл. 20.11.2012.
11. Патент на изобретение US 5744705 «Method and apparatus for engine testing», опубл. 27.02.1997.
12. Горбачев А.А., Кулешова Е.Н. (после брака Пантюшина). Исследование влияния формы сферического отражателя на точность измерения перемещений поршня в цилиндре клапана // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 6 (70). С. 12–16.
13. Holst G.C., Lomheim T.S. CMOS / CCD sensors and camera systems. Second edition. 2011. – 388 p.
14. Горбачев А.А., Кулешова Е.Н. (после брака Пантюшина), Лашманов О.Ю. Моделирование погрешности измерения линейных перемещений объекта в оптико-электронной системе // Труды X Международной конференции «Прикладная оптика-2012» (15–19 октября 2012 г.). Т. 2. СПб., 2012. С. 112–115.



**Подшивалов Александр Валерьевич**  
**Инженерно-физический факультет**  
**Кафедра информационных технологий топливно-энергетического**  
**комплекса**  
**E-mail: podshivalov2005@mail.ru**

## **ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В КОМПЛЕКСНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

А.В. Подшивалов

Научный руководитель – профессор В.В. Зуев

### **Цель и задачи**

#### **Цели проекта:**

- изучение процессов фазового разделения в различных по структуре многокомпонентных полимерных системах методом электронной сканирующей микроскопии;
- применение аналитического описания гистограмм размера частиц с использованием уравнений модели агрегации;
- разработка и усовершенствование технологических схем производства исследуемых материалов для применения их в устройствах.

Цель проекта подразумевает решение следующих научно-исследовательских задач:

- изучение процесса смешивания и морфологии полимерного композита ПЭНП/ПА-6, усиленного наночастицами органически-модифицированной глины и полимерным совместителем, а также предложение практических рекомендаций по созданию технологической схемы промышленного производства данного композита;
- изучение процесса синтеза и разработка практических рекомендаций по созданию технологической схемы промышленного производства полиуретановых микрокапсул, содержащих различные вещества и/или смеси веществ (например, биологически активное каланговое масло), применяемых для увеличения срока сохранения их полезных свойств и защиты от окисления на воздухе;
- изучение кинетики процесса синтеза проводящего / не проводящего наноструктурированного полианилина для применения в устройствах класса «Hi-tech» путем окислительной полимеризации анилина на базе малых предприятий, а также вынесение практических рекомендаций по созданию технологической схемы промышленного производства этого актуального полимера.

Сферы применения такого материала выражены достаточно обширно, например:

- конденсаторы высокой емкости с плотно упакованной гранулированной наноструктурой полианилина (не проводящая форма);
- различные датчики и регистраторы, в частности датчики для кантилевера атомно-силового микроскопа, где необходима наноструктура из взаимозаменяемых, равных по длине и диаметру нановолокон полианилина (проводящая форма);
- прорабатывается возможность применения наноструктурированного полианилина для создания модулей памяти различных видов, например для расширения возможностей современных мобильных устройств (смартфоны, планшеты и пр.), для интеграции в одежду и нанесения на кожу, альтернатива идентификационных меток для супермаркетов и т. д.

### **Методы исследований**

Для описания изучаемых многокомпонентных систем с точки зрения необратимой термодинамики все образцы приготовленных полимеров были подвергнуты электронно-микроскопическим исследованиям с использованием электронного микроскопа. В результате были получены электронно-микроскопические изображения смесей. В дальнейшем, для теоретического описания морфологии и процессов фазового разделения, они были

подвергнуты сегментации с применением графического редактора «Adobe Photoshop CS5» с использованием системы слоев улучшающих визуальное выделение фазы минорного компонента.

Далее сегментированные микрофотографии анализировались статистически, с использованием специального программного обеспечения «UTHSCSA ImageTool 3.0», разработанного в Центре Медицинских исследований университета штата Техас, Сан-Антонио, США, в результате чего были получены гистограммы размеров минорной фазы.

Аналитическое описание микрофотографий с точки зрения термодинамики необратимых процессов было выполнено с использованием программного алгоритма, построенного на основании адаптированной термодинамической модели агрегации [1, 2], позволяющей описывать эволюцию микроструктуры различных гетерогенных систем, в среде «QBasic». Описание полученных гистограмм размеров минорной фазы было оптимизировано с использованием данного алгоритма по подгоночным параметрам  $a_i$  и  $\Delta u_{0i}$  в среде программного пакета «OriginPro 8.1 SR3».

В основе модели лежат принципы необратимой термодинамики, используемые для описания эволюции микроструктуры, которая в каждый момент времени рассматривается как последовательность ограниченных квазиравновесных состояний. Используя модель, статистическое распределение характеристического размера  $s$  может быть описано уравнением [1, 2]:

$$h(s) = \sum_i^{i=N} a_i s_i^2 \exp\left(-\frac{s_i \Delta u_{0i}}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $a$  – нормировочный параметр,  $\Delta u_0$  – энергия агрегации,  $k$  – константа Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $N$  – количество статистических ансамблей,  $i$  – текущий статистический ансамбль.

Статистическое распределение характеризуется нормализованным математическим ожиданием  $Ms_i$ , которое является фактически средней площадью частиц в  $i$ -том ансамбле  $\langle s_i \rangle$ :

$$\langle s_i \rangle = Ms_i = \frac{\int_0^{\infty} s_i h(s_i) ds}{\int_0^{\infty} h(s_i) ds} = \frac{3kT}{\Delta u_{0i}}. \quad (2)$$

## Основные достигнутые результаты

### **Изучение процесса смещения и морфологии полимерного композита ПЭНП/ПА-6, усиленного наночастицами органически-модифицированной глины и полимерным совместителем**

В настоящее время актуальным направлением получения новых полимерных материалов является создание полимерных многокомпонентных смесей, обладающих высокими эксплуатационными свойствами и низкой стоимостью. Одним из возможных путей улучшения свойств полимерной смеси является введение добавок эмульгатора, совместителя и других компонентов. Так, добавка органически модифицированной глины в смесь несовместимых полимеров приводит к существенному улучшению ее механических свойств. Известно, что свойства полимерной смеси в значительной степени определяются ее морфологией. В связи с этим, цель настоящей работы – изучение влияния эмульгатора – органически модифицированной глины (20А) и совместителя – блок-сополимера стирола, этиленбутена и стирола с привитым малеиновым ангидридом (SEBS-g-MA) на морфологию и механические свойства смеси полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) с полиамидом-6 (ПА-6).

**Методика приготовления смесей.** Для приготовления смесей были использованы следующие компоненты:

- полиэтилен низкой плотности в количестве 75 % вес. марки Riblene FC20 производства компании Polimeri Europa, плотность 922 кг/м<sup>3</sup>;
- ПА-6 в количестве 25 % вес. производства компании Rhodia, плотность 1130 кг/м<sup>3</sup>;
- совместитель – блок-сополимер стирола, этиленбутена и стирола с привитым малеиновым ангидридом (SEBS-g-MA), добавляемый в количестве 2%, марки Kraton FG 1901X производства фирмы Kraton Polymers, содержит 30 % полистирола и 1,7 % малеинового ангидрида;
- эмульгатор – органически модифицированная глина, добавляемая в количествах 0,22; 1,33; 5 и 10 %, марки Cloisite™ 20A производства фирмы Southern Clay Products, получена из монтмориллонита натрия; содержание органических веществ 38,5 % вес.

Смесь ПЭНП/ПА-6 с добавками получали в смесительном экструдере Brabender Plasticorder с объемом смесительного цилиндра 50 мл при температуре 230 °С и скорости вращения шнека от 30 до 60 об/мин в течение 10 мин. Полученные образцы охлаждали при комнатной температуре. Электронно-микроскопические исследования образцов смесей выполняли с использованием микроскопа JEOL JSM-5600LV. Сколы образцов, полученные при разрушении в жидком азоте, обрабатывали 85 % муравьиной кислотой в течение двух суток и затем напыляли золотом в вакууме.

Механические измерения проводили на универсальной машине Instron 3365. Полученные значения модуля Юнга, прочности и удлинения при разрыве являются средними из десяти измерений [3]. Ударные свойства образцов смеси оценивали с использованием испытательной машины CEAST по методу Изода по результатам не менее пяти измерений [3].

Для анализа морфологии смесей ПЭНП/ПА-6 с добавками электронные микрофотографии подвергались сегментации в графическом редакторе с последующим статистическим анализом в программном обеспечении ImageTool 3.0 и аналитическим описанием полученных гистограмм с использованием уравнений модели обратимой агрегации [1, 2].

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 приведены микрофотографии реплик смесей и соответствующие им статистические распределения площади частиц фазы ПА-6, описанные с использованием модели обратимой агрегации. На микрофотографиях протравленная муравьиной кислотой фаза ПА-6 визуализируется в виде темных областей, а фаза ПЭНП – в виде светлых.

Приведенное на рис. 1г статистическое распределение площади частиц фазы ПА-6 удалось адекватно описать аналитически с использованием бимодальной версии уравнения модели (1) ( $N = 2$ ). Здесь и далее тонкие линии показывают индивидуальные (модовые) распределения, а толстые – суммарное бимодальное распределение.

Успешное аналитическое описание гистограмм бимодальным распределением свидетельствует о том, что частицы фазы ПА-6 образуют в процессе смешивания с ПЭНП два перекрывающихся термодинамически оптимизированных статистических ансамбля диспергированных и коалесцированных частиц. Известно, что при смешивании несовместимых полимеров частицы минорной фазы вначале диспергируются, а затем – в большинстве случаев – коалесцируют [4, 5]. Существование двух статистических ансамблей фазы ПА-6 позволяет обнаружить два ансамбля частиц фазы ПА-6 в фазе ПЭНП: ансамбль диспергированных частиц и ансамбль коалесцированных частиц. Используя уравнение (2), можно определить средний размер частиц ПА-6 в каждом из них: 3,33 мкм<sup>2</sup> и 17,6 мкм<sup>2</sup>, соответственно.

Статистические распределения, приведенные на рис. 1д и 1е адекватно описываются мономодальным уравнением (1) ( $N = 1$ ), что позволяет сделать вывод: добавка эмульгатора 20А подавляет процесс коалесценции частиц фазы ПА-6 в процессе смешивания с ПЭНП.

Из литературных данных известно [6, 7], что слабо полярный совместитель 20А одинаковым образом взаимодействует с обоими компонентами смеси и его частицы располагаются на границе их раздела. Предполагается, что локализация частиц 20А на границе раздела полимерных фаз препятствует коалесценции индивидуальных частиц минорной фазы и уменьшает их размер.

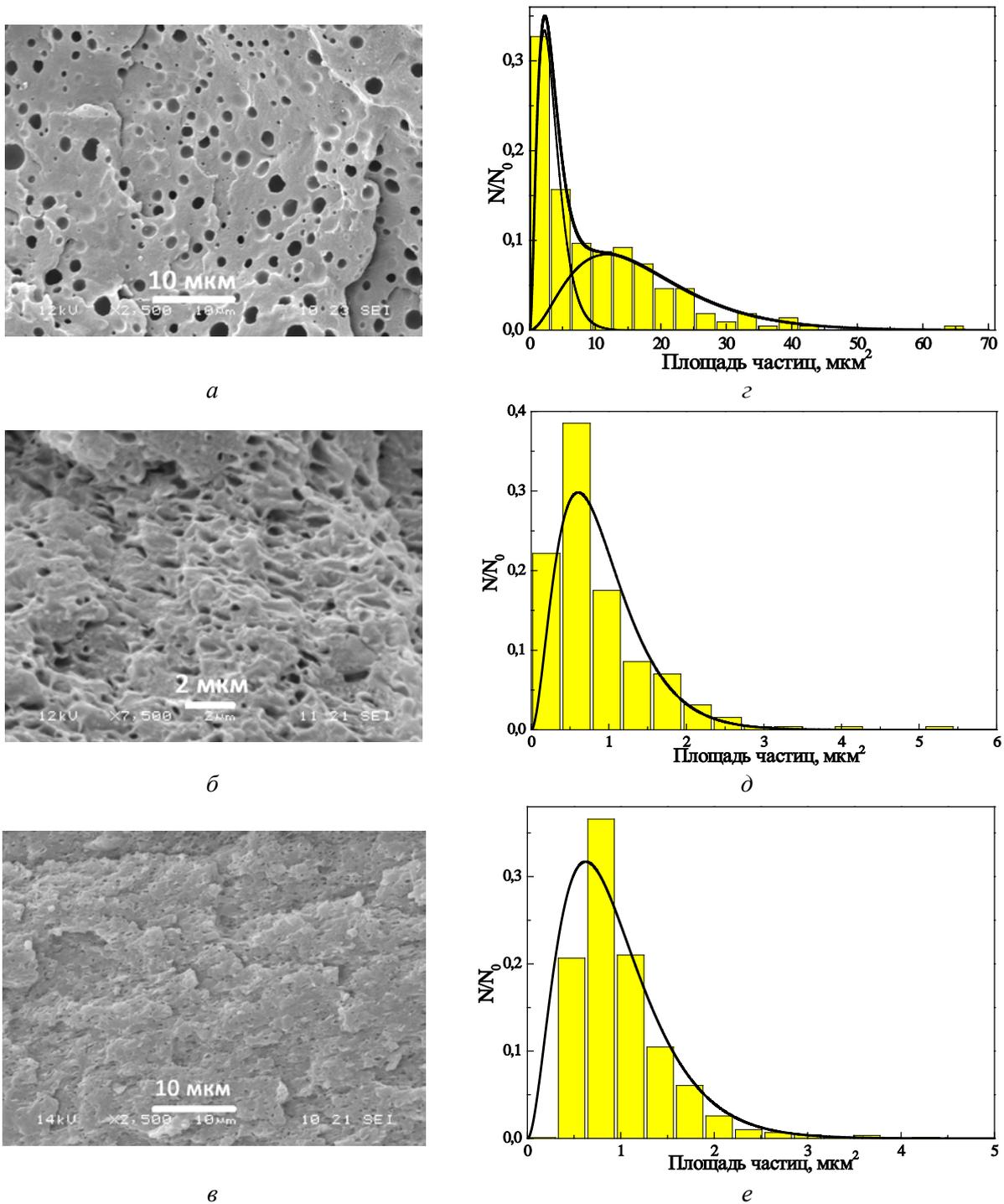


Рис. 1. Микрофотографии реплик сколов смесей: а – ПЭНП/ПА-6 (75/25 %); б – ПЭНП/ПА-6/20А (75/25/5 %); в – ПЭНП/ПА-6/20А (75/25/10 %); г, д, е – соответствующие статистические распределения размера частиц ПА-6

На рис. 2 приведена зависимость размера частиц минорной фазы в смеси ПЭНП/ПА-6/20А от количества добавленного эмульгатора 20А. Кривая 1 (рис. 2) иллюстрирует тот факт, что 20А является хорошим совместителем в смеси ПЭНП/ПА-6, снижая размер диспергированных частиц фазы ПА-6, причем величина добавки 20А (5 и 10 %) не оказывает существенного влияния на их размер. Кроме того, введение 20А в смесь ПЭНП/ПА-6 подавляет коалесценцию частиц фазы ПА-6 (кривая 2, рис. 2).

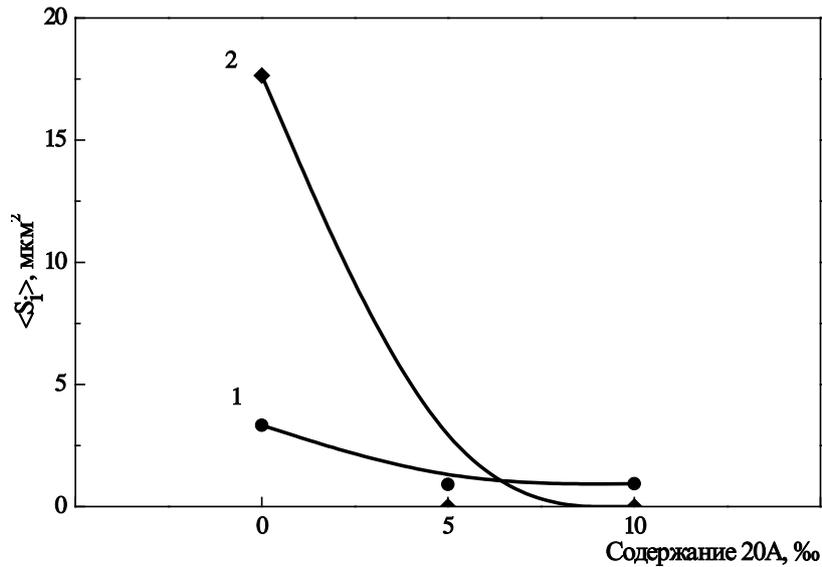


Рис. 2. Средняя площадь: 1 – диспергированных и 2 – коалесцированных частиц фазы ПА-6 в зависимости от содержания добавки 20А в смеси состава ПЭНП/ПА-6/20А

Улучшение диспергирования частиц минорной фазы при добавке 20А приводит к улучшению механических свойств смеси: модуль Юнга и предел прочности возрастают, а удлинение при разрыве уменьшается, то есть материал становится более жестким и хрупким. Ударная прочность его при этом уменьшается (рис. 3).

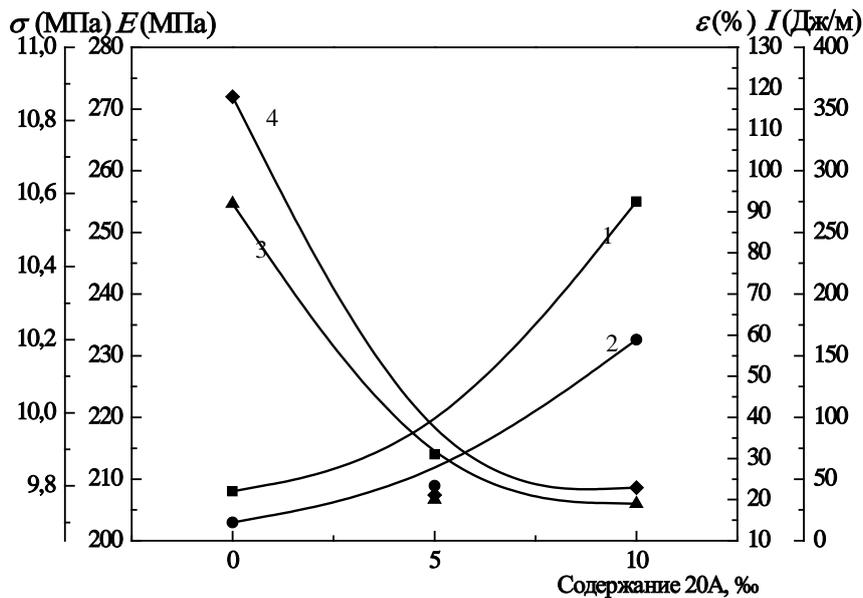


Рис. 3. Зависимости: 1 – ударной прочности; 2 – модуля Юнга; 3 – предела прочности; 4 – удлинения при разрыве смеси ПЭНП/ПА-6 в зависимости от количества добавленного эмульгатора 20А

На рис. 4 представлены микрофотографии реплик смесей полимеров ПЭНП и ПА-6 (75/25 %) с добавками: SEBS-g-MA в количестве 2 ‰; SEBS-g-MA в количестве 2 ‰ и 20А в количестве 0,22 и 1,33 ‰, а также статистические распределения размера частиц фазы ПА-6, аналитически описанные, с использованием модели обратимой агрегации.

Как видно из рис. 4, использование совместителя SEBS-g-MA, в том числе, в сочетании с эмульгатором 20А, не устраняет коалесценцию частиц фазы ПА-6, однако существенно улучшает ее диспергирование в смеси ПЭНП/ПА-6: размер диспергированных частиц фазы ПА-6 уменьшается с 3,3 мкм<sup>2</sup> (ПЭНП/ПА-6) до 0,5 мкм<sup>2</sup> (ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-MA), а коалесцированных частиц фазы ПА-6 – с 17,5 мкм<sup>2</sup> (ПЭНП/ПА-6) до 1,5 мкм<sup>2</sup> (ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-MA) (рис. 5).

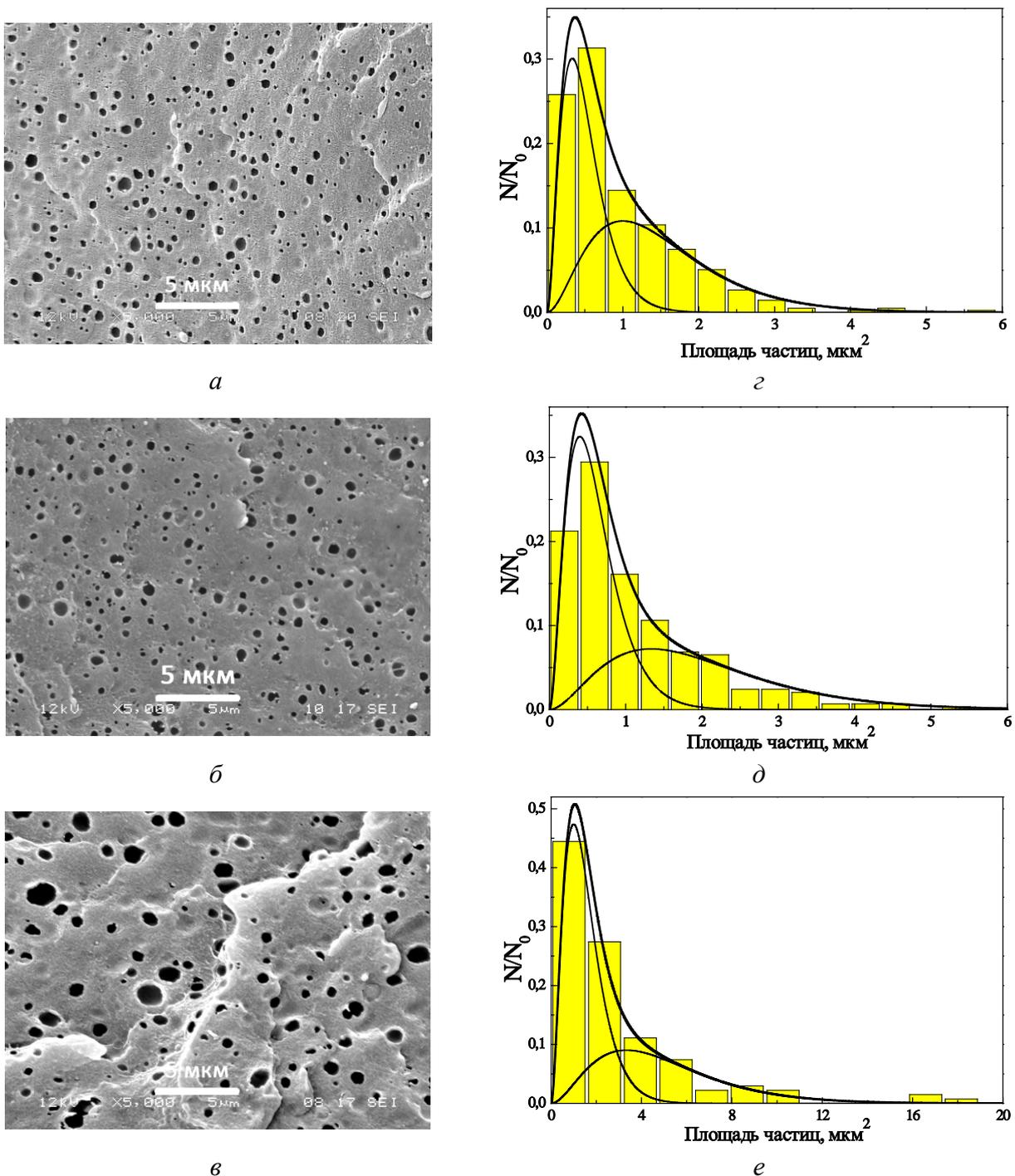


Рис. 4. Микрофотографии реплик смесей: а – ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-MA (75/25%/2‰); б – ПЭНП/ПА/SEBS-g-MA/20A (75/25%/2/0,22‰); в – ПЭНП/ПА/SEBS-g-MA/20A (75/25%/2/1,33‰), г, д, е – соответствующие статистические распределения размера частиц минорной фазы ПА-6

Из литературных данных известно [6, 7], что добавка SEBS-g-MA снижает уровень межфазового напряжения в смеси ПЭНП/ПА-6, следовательно, ускоряет оба процесса трансформации частиц фазы ПА-6: диспергирование и их последующую коалесценцию. Дополнительное введение второго совместителя (20A) в композит не оказывает существенного влияния на эволюцию его морфологии. Вероятно, он препятствует диспергированию фазы ПА-6. В результате средний размер индивидуальных частиц ПА-6 увеличивается (до  $0,5 \text{ мкм}^2$  при введении 0,22‰ 20A и до  $1,5 \text{ мкм}^2$  при введении 1,33‰ 20A), также как и средний размер коалесцированных частиц ПА-6 (до  $2 \text{ мкм}^2$  при введении 0,22‰ 20A и до  $5 \text{ мкм}^2$  при введении 1,33‰ 20A), что изображено на рис. 5.

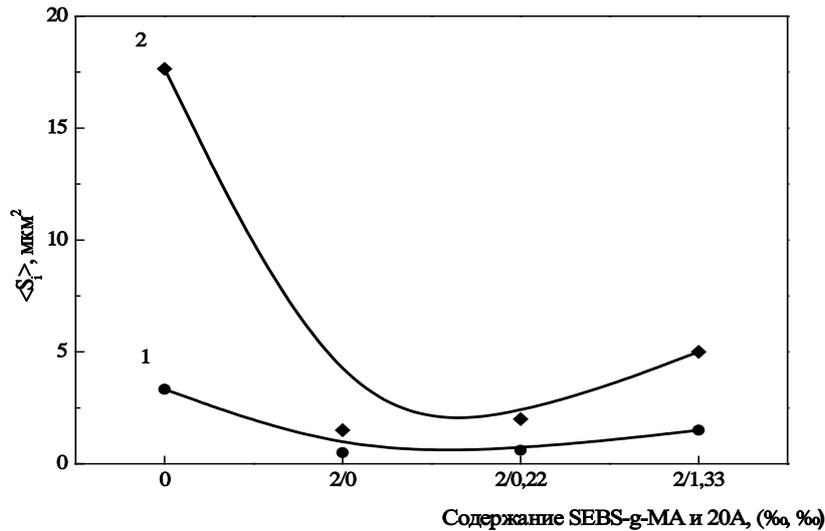


Рис. 5. Средняя площадь: 1 – диспергированных и 2 – коалесцированных частиц фазы ПА-6 в зависимости от содержания добавок SEBS-g-MA и 20A в смеси состава ПЭНП/ПА-6/SEBS-g-MA/20A

Совместное использование добавок SEBS-g-MA и 20A снижает модуль Юнга материала, однако увеличивает деформацию при испытаниях на растяжение, то есть материал становится менее жестким и более эластичным. По этой причине наблюдается существенное улучшение прочности по Изоду (рис. 6).

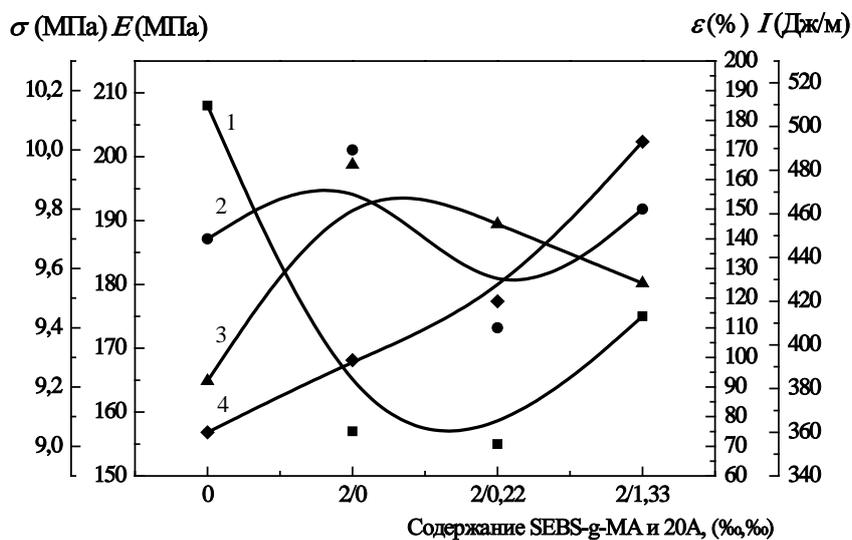


Рис. 6. Зависимости: 1 – ударной прочности; 2 – модуля Юнга; 3 – предела прочности; 4 – удлинения при разрыве смеси ПЭНП/ПА-6 в зависимости от количества добавляемого совместителя SEBS-g-MA и/или эмульгатора 20A

**Выводы и практические рекомендации.** С использованием метода электронной микроскопии исследована морфология смеси ПЭНП/ПА-6 с добавками совместителя и эмульгатора. Удалось описать с использованием модели агрегации гистограммы размера частиц фазы ПА-6, распределенной в фазе ПЭНП, выявить ансамбли диспергированных и коалесцированных частиц фазы ПА-6, а также определить средний размер частиц в каждом ансамбле. Сопоставление полученных результатов с данными механических испытаний позволило установить, что добавка 20A существенно увеличивает диспергирование частиц фазы ПА-6. Она приводит к получению материала с высокими механическими характеристиками, что подтверждают испытания на растяжение. При совместном

использовании совместителя SEBS-g-MA и эмульгатора 20А избежать коалесценции частиц фазы ПА-6 не удастся, поэтому одновременное их использование эффективно только при необходимости получения материала с высокими ударными свойствами.

### **Изучение процессов фазового разделения в ходе синтеза полиуретановых микрокапсул, содержащих биологически активное каланговое масло**

В последнее время в химии актуально направление, которое называется «зеленая химия». Оно подразумевает разумный переход к использованию растительных и природных компонентов. В связи с этим целесообразным представляется изучение процесса микрокапсулирования растительного калангового масла, известного своей антибактериальной активностью, в частности, против бактерий золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*) для предотвращения его окисления и деструкции. В промышленном производстве микрокапсул предъявляются строгие требования к их диаметру (он является ключевой характеристикой, влияющей на свойства капсул) и дисперсии диаметра.

Цель настоящей работы – оценка влияния скорости перемешивания компонентов в процессе микрокапсулирования калангового масла на формирование, структуру и размер образующихся полиуретановых микрокапсул.

**Методика синтеза микрокапсул.** Микрокапсулы синтезировали межфазной полимеризацией уретана в эмульсии типа «масло в воде» при различных режимах скорости перемешивания компонентов. На диспергированных в воде каплях калангового масла полимеризовался уретан, образуя микрокапсулу. Далее с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 5800 LV были получены электронные микрофотографии микрокапсул, синтезированных при различных скоростях перемешивания компонентов.

На первом этапе исследований микрофотографии были подвергнуты сегментации в графическом редакторе. Затем они анализировались статистически с использованием программного обеспечения UTHSCSA Image Tool 3.0, в результате чего были получены гистограммы размера микрокапсул. Затем они описывались с использованием алгоритма, построенного на основании уравнения модели обратимой агрегации [1, 2].

Принимая во внимание круговую форму проекции микрокапсул на плоскость микрофотографии, средний диаметр микрокапсул  $\langle d_i \rangle$  был установлен по уравнению:

$$\langle d_i \rangle = 2\sqrt{\frac{\langle s_i \rangle}{\pi}} \quad (3)$$

Для установления содержания калангового масла  $W_{go}$  в микрокапсулах были проведены термогравиметрические исследования с использованием прибора Perkin Elmer TGA7 при температуре 120 °С в течение часа [8]. Вычисления выполнялись по формуле:

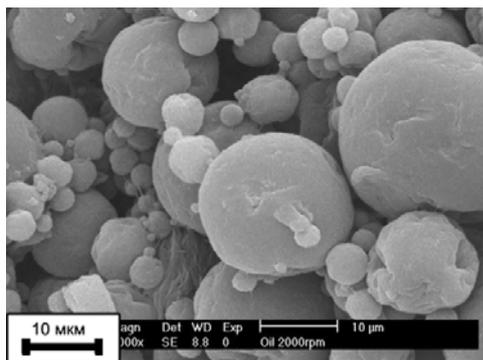
$$W_{go} = \frac{W_m - W_0}{W_m} \times 100\% \quad (4)$$

где  $W_m$  и  $W_0$  вес микрокапсул до и после полного испарения калангового масла.

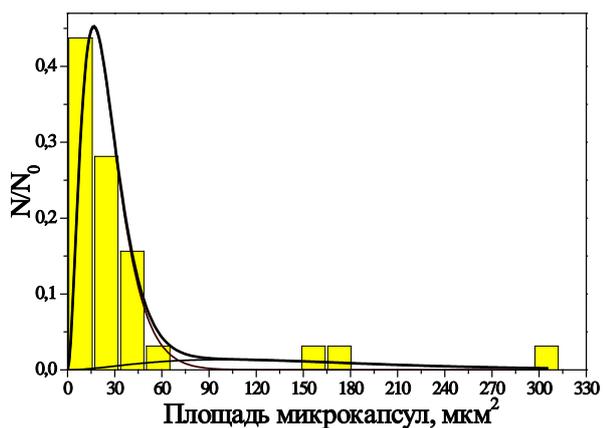
**Обсуждение результатов.** На рис. 7 приведены микрофотографии микрокапсул, синтезированных при скоростях перемешивания компонентов 2000, 3000, 4000 и 10000 об/мин, а также соответствующие им статистические распределения размера микрокапсул, описанные с использованием уравнения модели обратимой агрегации.

Оказалось, что статистические распределения удается адекватно описать с использованием уравнения (1) при  $N = 2$ , что говорит о наличии двух статистических ансамблей микрокапсул при всех режимах скорости перемешивания компонентов.

Из литературы известно, что в процессе смешивания возможно одновременное протекание двух процессов: образование первичных микрокапсул и их коалесценция. Тогда становится ясным, что микрокапсулы, не вошедшие в первый статистический ансамбль – это коалесцированные микрокапсулы, которые и образуют второй ансамбль.



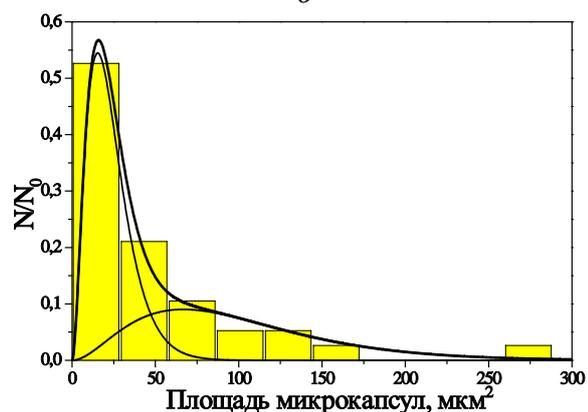
а



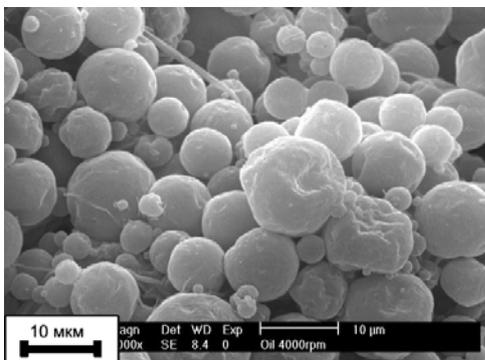
д



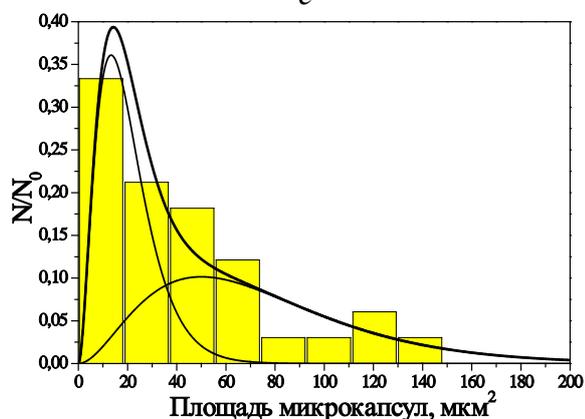
б



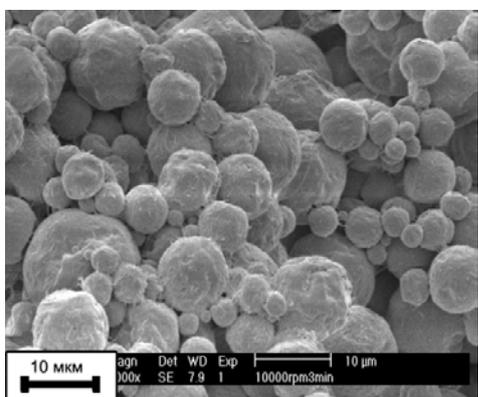
е



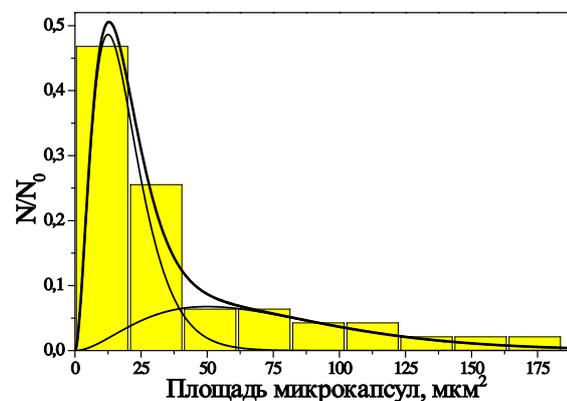
в



ж



з



з

Рис. 7. Микрофотографии микрокапсул, синтезированных при скоростях перемешивания компонентов: а – 2000; б – 3000; в – 4000; г – 10000 об/мин; д, е, ж, з – соответствующие им статистические распределения размера микрокапсул

На гистограммах статистические ансамбли индивидуальных и коалесцированных микрокапсул показаны тонкими линиями; вместе они образуют бимодальное распределение, изображенное жирной линией. На микрофотографиях видно, что при высоких скоростях перемешивания, например 10000 об/мин, микрокапсулы имеют грубую, местами вогнутую, форму, что свидетельствует об их механическом повреждении.

Изменение среднего диаметра микрокапсул в зависимости от скорости перемешивания компонентов в системе, рассчитанное по выражению (3), представлено на рис. 8. Наибольшее изменение диаметра микрокапсул наблюдается при средней скорости перемешивания в диапазоне от 2000 до 4000 об/мин, далее он меняется незначительно.

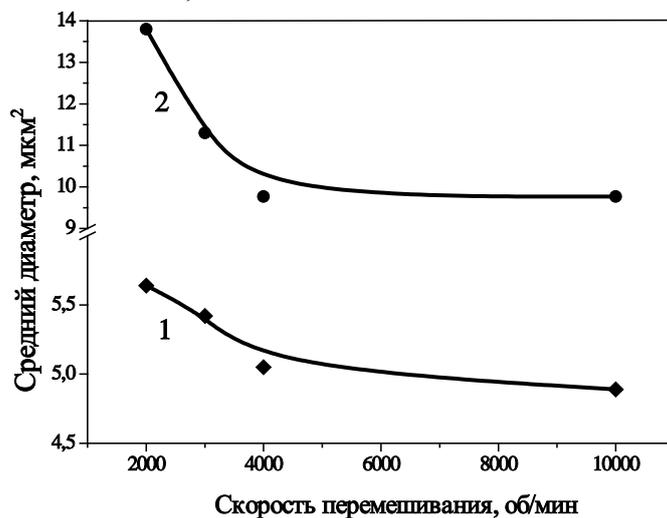


Рис. 8. Средний диаметр: 1 – первичных микрокапсул и 2 – коалесцированных в зависимости от скорости перемешивания компонентов системы

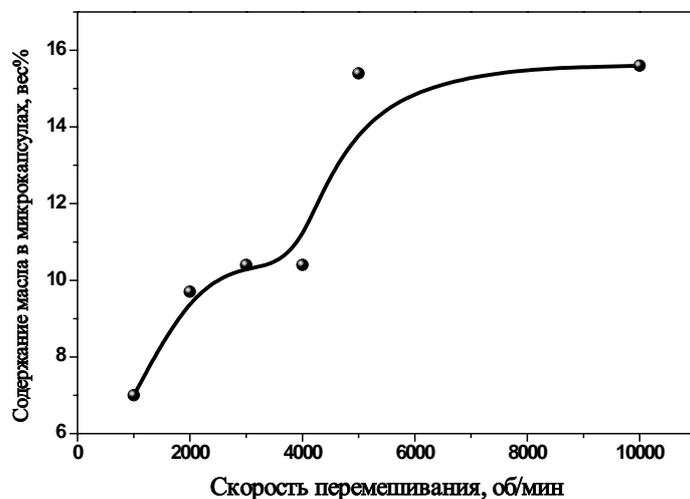


Рис. 9. Содержание калангового масла внутри микрокапсул в зависимости от скорости перемешивания компонентов системы

На рис. 9 приведены результаты термогравиметрического анализа микрокапсул, которые показывают содержание калангового масла внутри них, при соответствующих скоростях перемешивания компонентов системы. Расчеты выполнены по выражению (4). Повышение скорости перемешивания приводит к увеличению содержания масла в капсулах, следовательно, расход капсулирующего полиуретана для создания капсул с большим содержанием масла и меньшей толщиной полимерной оболочки капсулы уменьшается.

#### Выводы и практические рекомендации:

1. Размером полиуретановых микрокапсул, содержащих каланговое масло можно управлять с помощью изменения скорости перемешивания компонентов в системе.

2. Наибольшее влияние на средний диаметр микрокапсул оказывает скорость перемешивания в диапазоне от 2000 до 4000 об/мин, при дальнейшем повышении скорости средний диаметр меняется незначительно.

3. В процессе перемешивания компонентов системы одновременно протекают два процесса: образование первичных микрокапсул и их коалесценция, о чем свидетельствует наличие двух статистических ансамблей микрокапсул.

4. При повышении скорости перемешивания компонентов до максимально высокой (10000 об/мин), микрокапсулы могут повреждаться; в то же время высокая скорость перемешивания повышает содержание масла внутри капсул и уменьшает расход капсулирующего полиуретана, что благоприятно сказывается на оптимизации и удешевлении процесса их производства.

### **Изучение кинетики процесса синтеза проводящего наноструктурированного полианилина для применения в устройствах класса «НИ-ТЕСН»**

Полианилин (ПАНИ) является одним из наиболее востребованных проводящих полимеров благодаря простоте его синтеза и экологической стабильности. В настоящее время ПАНИ применяется для изготовления многих высокотехнологичных устройств, включая электроды для точной электроники и светодиодов, химические датчики, конденсаторы и батареи. Свойства этих устройств чувствительны к форме частиц ПАНИ и его молекулярной массе, которые задаются условиями синтеза. Поэтому исследование кинетики окислительной полимеризации анилина является необходимым условием для понимания свойств, морфологии и спектра применения ПАНИ.

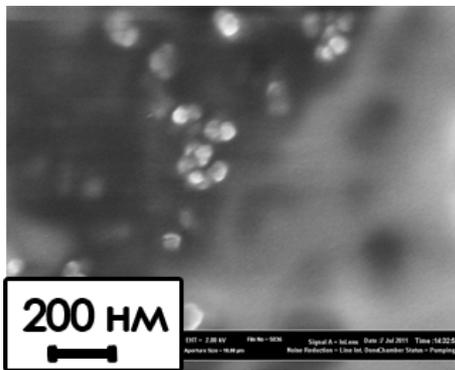
В работе изучалась кинетика окислительной полимеризации анилина методом электронной микроскопии с применением статистического анализа и последующим аналитическим описанием гистограмм размера гранул ПАНИ с использованием модели агрегации [1, 2], описывающей эволюцию микроструктуры в рамках термодинамики необратимых процессов. Модель была успешно применена ранее для описания ансамблей частиц минорной фазы в смеси ПЭНП/ПА-6 с органически модифицированной глиной, ансамблей полиуретановых микрокапсул, содержащих каланговое масло, и многих других систем.

**Методика синтеза.** В работе реализован наиболее распространенный метод синтеза ПАНИ с использованием сильного окислителя (пероксисульфат аммония) и анилина при высоком уровне кислотности ( $\text{pH} < 2,5$ ). Свежеприготовленные растворы сульфата анилина (0,2 М) и пероксисульфата аммония (0,25 М) сливали в стеклянной чашке при температуре 20 °С без перемешивания. Затем ПАНИ осаждали на предметных стеклах 3×2 см в виде пленки. Электронные микрофотографии, регистрирующие процесс полимеризации, были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Supra 55 VP (Carl Zeiss, Германия). Затем они были подвергнуты сегментации и последующему статистическому анализу с использованием программного обеспечения UTHSCSA Image Tool 3.0. Полученные гистограммы размера гранул ПАНИ были описаны с использованием алгоритма, построенного на основании уравнений модели агрегации [1, 2].

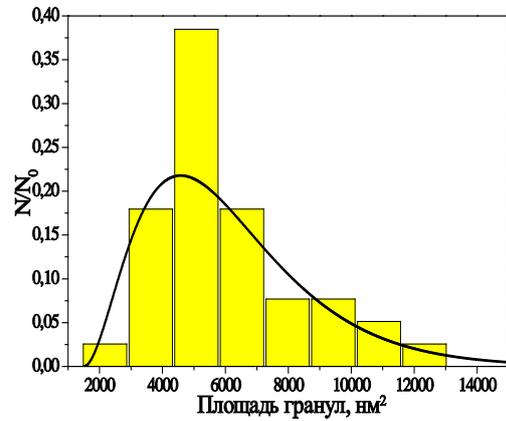
**Обсуждение результатов.** На рис. 10 представлены микрофотографии гранул ПАНИ, осевших на предметном стекле в течение 8 мин. реакции, и соответствующие им статистические распределения размера гранул.

Для описания статистических распределений, приведенных на рис. 10з и 10и успешно использована мономодальная версия уравнения модели агрегации (1),  $N = 1$ ). Однако статистическое распределение на рис. 10к ( $t = 3$  мин) удалось адекватно описать уравнением (1) лишь при значении  $N = 2$ , что говорит о наличии двух статистических ансамблей гранул на этой стадии полимеризации. На рис. 10к тонкие линии иллюстрируют индивидуальные распределения, а жирная – суммарное. Статистические распределения на рис. 10л–10о были успешно аналитически описаны с использованием мономодального уравнения (1),  $N = 1$ , что говорит о существовании лишь одного статистического ансамбля гранул в интервале 4–8 мин. процесса полимеризации. Аналитическое описание гистограмм размера гранул ПАНИ

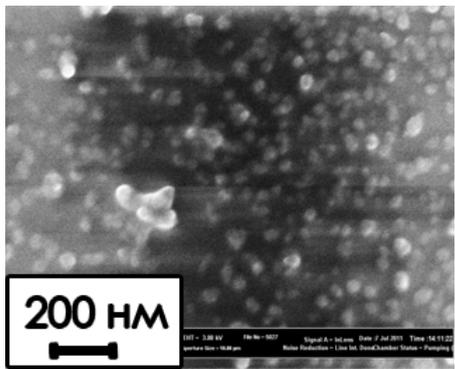
и визуальный анализ микрофотографий показывают, что в начале реакции (1 мин.) на предметном стекле образуются первичные гранулы ПАНИ, далее количество и размер их увеличивается (2 мин.) и, наконец, достигнув максимального размера, они образуют плотно упакованную гранулированную пленку или монослой ПАНИ (3 мин.). Затем в промежутке времени 3–8 мин. количество гранул сильно возрастает, а их размер уменьшается. Это свидетельствует об образовании новых гранул непосредственно на монослой, образовавшемся в течение первых 3 мин. реакции.



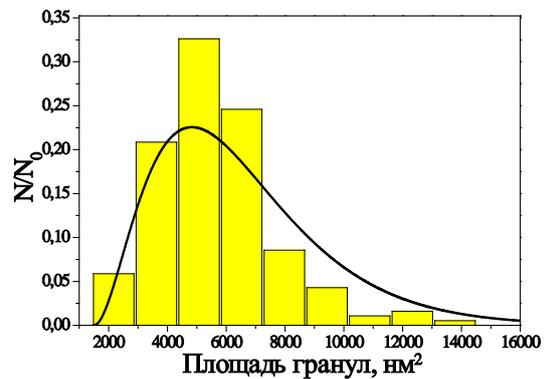
а



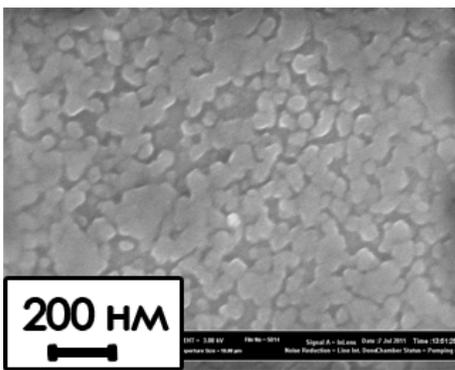
з



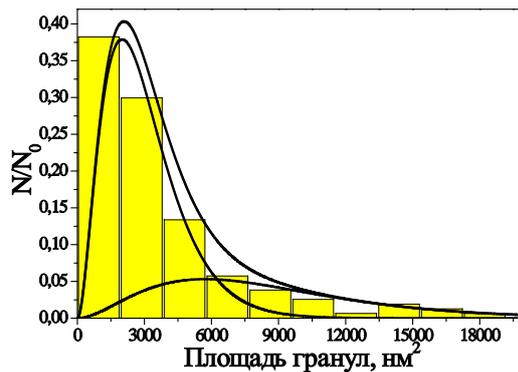
б



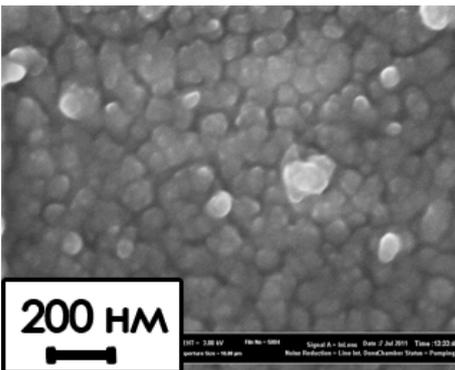
и



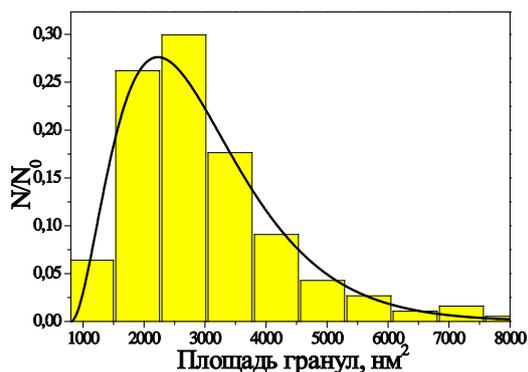
в



к



г



л

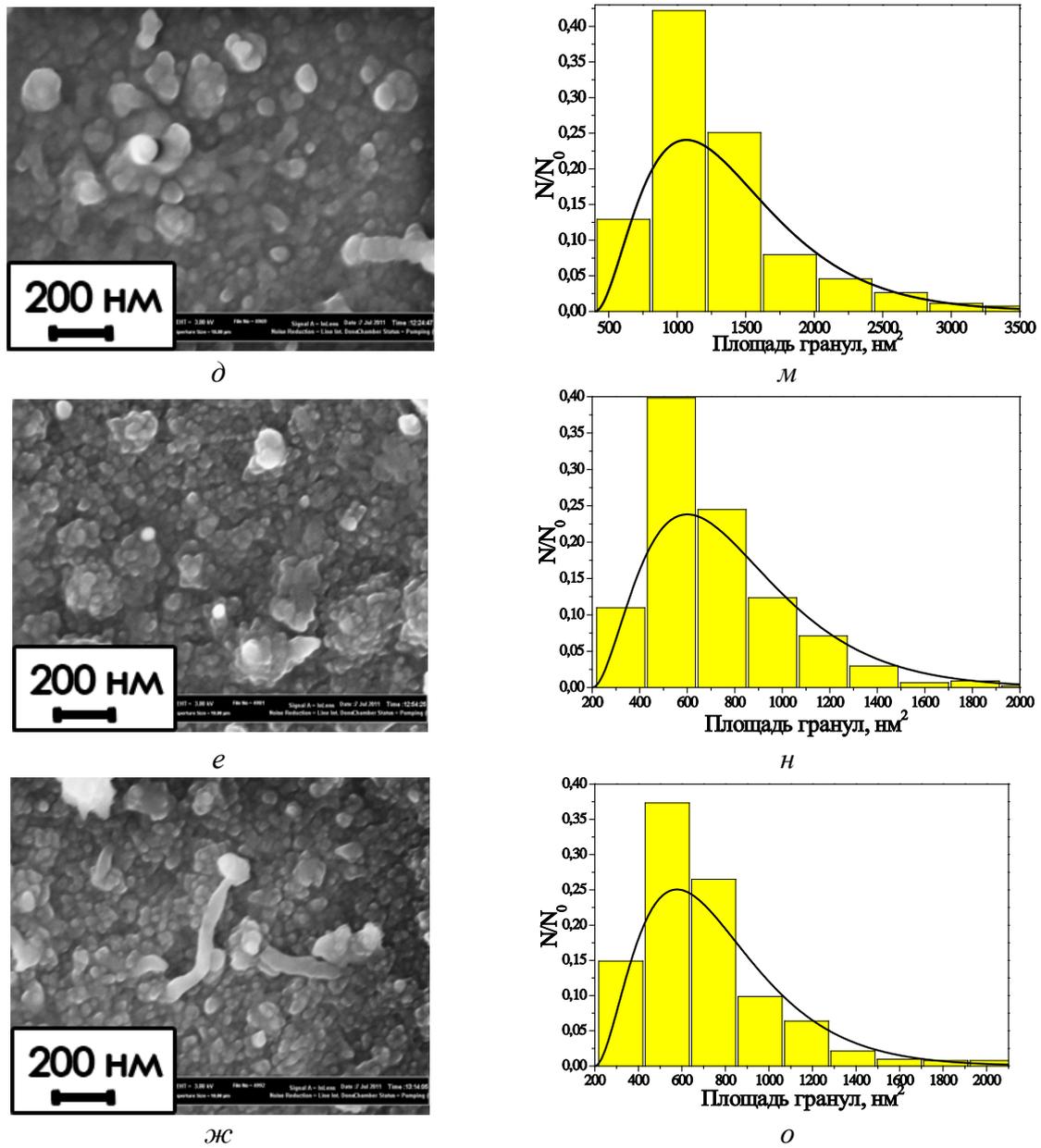


Рис. 10. Микрофотографии: а–ж – гранулы ПАНИ, осевшие в течение 8 мин. реакции окислительной полимеризации анилина; з–о – соответствующие им статистические распределения размера гранул ПАНИ

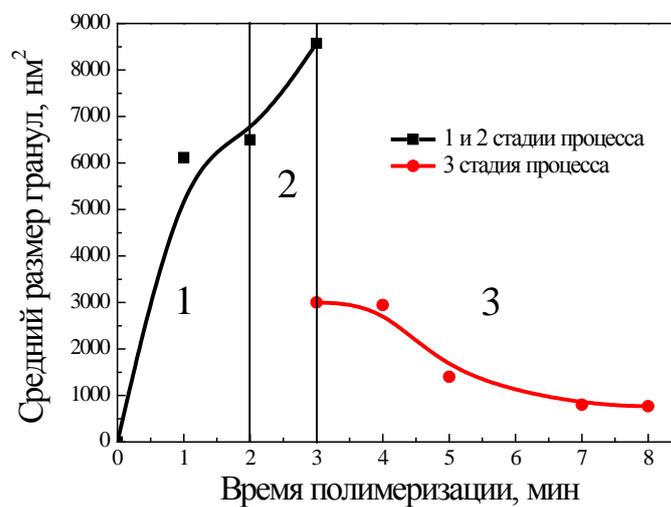


Рис. 11. Зависимость среднего размера гранул ПАНИ от времени полимеризации и топохимические стадии процесса

Обнаруженная закономерность отражается на зависимости среднего размера гранул от времени полимеризации (рис. 11). Она показывает, что процесс окислительной полимеризации анилина состоит из трех стадий: образование и рост первичных гранул (0–2 мин.), образование монослоя ПАНИ (2–3 мин.) и образование новых гранул на монослое (3–8 мин.).

Количество образующихся гранул ПАНИ также зависит от времени полимеризации (рис. 12). На первой стадии (0–2 мин.) образуются первичные гранулы и их количество возрастает. Однако на второй стадии (2–3 мин.) образование новых гранул прекращается и их средний размер достигает максимального значения. Можно предположить, что из гранул образовался монослой. На третьей стадии процесса (3–8 мин.) количество гранул постепенно возрастает, что говорит об образовании новых непосредственно на монослое.

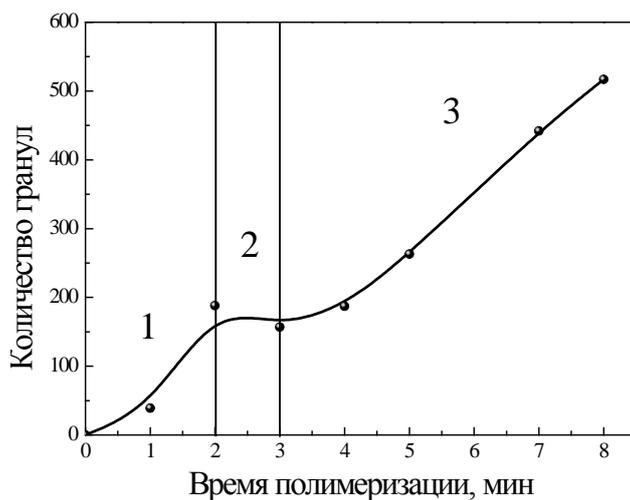


Рис. 12. Зависимость количества гранул ПАНИ от времени полимеризации и топохимические стадии процесса

Обнаруженные закономерности свидетельствуют о топохимической природе реакции образования олигомеров анилина, которые, в свою очередь, становятся центрами инициации роста новых гранул ПАНИ (3–8 мин.) на монослое, образовавшемся в промежутке 0–3 мин.

**Выводы и практические рекомендации.** Изучена кинетика окислительной полимеризации анилина методом сканирующей электронной микроскопии с последующим статистическим анализом и кинетическим описанием при использовании уравнений модели обратимой агрегации. Установлено, что синтез ПАНИ данным методом может быть описан как топохимический процесс. Это позволило сделать вывод о существовании трех фаз процесса: образование и рост первичных гранул, образование монослоя ПАНИ и образование на нем новых гранул.

### Области возможного использования результатов проекта

Достигнутые в ходе реализации проекта результаты имеют большое значение для различных сфер промышленности, производства и экономики:

- Результаты исследования полимерного композита ПЭНП/ПА-6 с эмульгатором и совместителем позволяют подобрать оптимальный режим смешивания компонентов для получения смеси с требуемыми механическими свойствами при растяжении и снизить себестоимость готового продукта.

- Результаты изучения процесса микрокапсулирования полиуретаном целебного калангового масла позволят оптимизировать режим синтеза микрокапсул, содержащих не только каланговое масло, но и другие вещества, чьи полезные свойства необходимо консервировать длительное время, например наноструктурированный полианилин.

- Результаты, достигнутые в ходе исследования кинетики роста гранулированной наноструктуры полианилина в ходе окислительной полимеризации анилина, позволяют создать наноструктурированный полианилин для применения его при создании устройств класса «Hi-tech».

В настоящее время ведется проработка других путей применения результатов этих важнейших исследований, а также других многокомпонентных систем, имеющих большое практическое значение.

### Публикации

1. Podshivalov A.V., Zuev V.V., Bronnikov S.V., Shishov M.A. The oxidative polymerization of aniline as topochemical process. The statistical analysis of grain growth // *European Polymer Journal*. 2013. Vol. 49. No 10. P. 3271–3276.
2. Podshivalov A.V., Zuev V.V., Bronnikov S.V., Jiamrungraksa T., Charuchinda S. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil. The statistical analysis of encapsulation // *Journal of Microencapsulation*. 2013. Vol. 30. No 2. P. 198–203.
3. Подшивалов А.В., Бронников С.В., Зуев В.В. Влияние добавок эмульгатора и совместителя на морфологию и механические свойства смеси полиэтилена с полиамидом // *Вопросы материаловедения*. 2012. Вып. 72. № 4. С. 363–369.
4. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Кинетика окислительной полимеризации анилина. Статистический анализ роста наноструктуры полианилина // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. Вып. 4. № 86. С. 96–100.
5. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Термодинамический анализ процессов образования двухкомпонентных полимерных смесей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. Вып. 3. № 79. С. 114–118.
6. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Статистический анализ морфологии смеси ПЭНП / ПА-6 с добавкой совместителя и эмульгатора // *Физико-химия полимеров: Синтез, свойства и применение*. Т. 1. Вып. 18. Тверь, 2012. С. 74–79.
7. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Статистический анализ размера полиуретановых микрокапсул, содержащих каланговое масло // *Физико-химия полимеров: Синтез, свойства и применение*. Вып. 19. Тверь, 2013. С. 88–93.
8. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Термодинамический анализ процессов фазового разделения в смеси несовместимых полимеров // *Научные работы участников конкурса «Молодые ученые НИУ ИТМО» 2012 года*. СПб., 2013. С. 182–187.
9. Podshivalov A.V., Bronnikov S.V., Zuev V.V. Statistical analysis of the LDPE / PA6 blend morphology // *Современные проблемы науки о полимерах: Программа и тезисы докладов 7-й Санкт-Петербургской конференции молодых ученых (17–20 октября 2011 г.)*. СПб., 2011. С. 61.
10. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil: Statistical analysis of encapsulation // *Современные проблемы науки о полимерах: Программа и тезисы докладов 8-й Санкт-Петербургской конференции молодых ученых (12–15 ноября 2012 г.)*. СПб., 2012. С. 69.
11. Подшивалов А.В., Бронников С.В., Зуев В.В. Статистический анализ размера полиуретановых микрокапсул, содержащих каланговое масло // *Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов: Тезисы докладов Международной научной конференции*. СПб., 2012. С. 15–17.
12. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Кинетика окислительной полимеризации анилина. Статистический анализ роста частиц полианилина // *Сб. тезисов докладов II Всероссийского конгресса молодых ученых*. Вып. 4. СПб., 2013. С. 168–169.

### Литература

1. Kilian H.G., Metzler R., Zink B. Aggregate model of liquids // *Journal of Chemical Physics*. 1997. Vol. 107. P. 8697.
2. Kilian H.G., Bronnikov S., Sukhanova T. Transformations of the micro-domain structure of polyimide films during thermally induced chemical conversion: characterization via thermodynamics of irreversible processes // *Journal of Physical Chemistry B*. 2003. Vol. 107. No 49. P. 13575–13582.

3. Filippi S., Dintcheva N.T., Scaffaro R. et al. Effects of organoclay on morphology and properties of nanocomposites based on LDPE / PA-6 blends without and with SEBS-g-MA compatibilizer // *Polymer Engineering and Science*. 2009. Vol. 49. No 6. P. 1187–1197.
4. Fortelny I., Zivny A., Juza J. Coarsening of the phase structure in immiscible polymer blends: Coalescence or Ostwald ripening? // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 1999. Vol. 37. P. 181–187.
5. Fillipone G., Netti P.A., Acierno D. Microstructural evolutions of LDPE / PA-6 blends by rheological and rheo-optical analyses: Influence of flow and compatibilizer on break-up and coalescence processes // *Polymer*. 2007. Vol. 48. P. 564–573.
6. Mehrabzadeh M., Kamal M.R. Polymer-clay nanocomposites based on blends of polyamide-6 and polyethylene // *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2002. Vol. 80. P. 1083.
7. Chow W.S., Ishak Z.A., Ishiaku U.S. et al. The effect of organoclay on the mechanical properties and morphology of injection-molded polyamide 6 / polypropylene nanocomposites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2004. Vol. 91. P. 175.
8. Podshivalov A.V., Zuev V.V., Bronnikov S.V. et al. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil. The statistical analysis of encapsulation // *Journal of Microencapsulation*. 2013. Vol. 30. No 2. P. 198–203.



**Поляков Николай Александрович**  
**Факультет компьютерных технологий и управления**  
**Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем**  
**E-mail: polyakov.ets.itmo@gmail.com**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ И КОРРЕКЦИЕЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА СЕТЕВОГО ТОКА**

Н.А. Поляков

Научный руководитель – доцент В.С. Томасов

### Введение

#### Описание проблемы

В связи с повсеместным распространением преобразовательной техники, ростом единичных мощностей преобразователей и повышением в целом доли нелинейной нагрузки, проблемы обеспечения качества электроэнергии и энергосбережения приобретают все большее значение. Требования международных стандартов, таких как IEC 61000-3, IEEE 519, к качеству энергопотребления с годами постоянно ужесточаются. Эта тенденция распространилась в последние годы и на Россию. Все более ужесточаются рамки требований к гармоническому составу токов и напряжений питающей сети, диктуемые как ГОСТом, так и международными стандартами (например, ГОСТ Р 51317.3.2-2006, соответствующий международному стандарту МЭК 61000-3-2:2005 или вступивший в силу с января 2013 г. ГОСТ Р 54149-2010). О государственной значимости этого вопроса свидетельствует принятие Закона «Об электромагнитной совместимости». В целом можно сказать, что проблема преимущественно сферы преобразовательной техники превращается в проблему электроэнергетики.

Сегодня больше половины электрической энергии, вырабатываемой электрическими станциями, потребляется электроприводами, большая часть которых в своем составе имеет

двигатель переменного тока (синхронный или асинхронный). Для систем полупроводниковых преобразователей и регулируемых электроприводов как постоянного, так и переменного тока с обратимым характером энергопотребления, повышение энергетической эффективности в силовых схемах достигается за счет применения полностью управляемых полупроводниковых приборов и импульсно-модуляционных методов управления, реализуемых на современных микроконтроллерных средствах вычислительной техники. Использование этого принципа позволяет при минимизации на достижимом уровне потерь в силовых полупроводниковых преобразователях активно влиять на их энергетическую и электромагнитную совместимость с питающей сетью. Схемы, построенные по такому принципу, носят в отечественной литературе название полностью управляемых или активных преобразователей. В англоязычной литературе используется термин преобразователь переменного/постоянного тока, соответствующий терминологии стандарта МЭК 60050-551 (AC/DC Converter).

Активные преобразователи могут обеспечить небольшой уровень гармонических искажений потребляемого тока и высокий коэффициент мощности. Высокопроизводительные активные выпрямители уже давно привлекли к себе внимание в областях, где предъявляются жесткие требования к показателям качества электрической энергии, однако, несмотря на этот интерес, они имеют существенные недостатки. Один из них связан с тем, что система управления таким преобразователем оказывается крайне чувствительной к наличию гармонических искажений входного напряжения, что приводит к существенному снижению эффективности преобразователя в тех случаях, когда питающая сеть не сбалансирована или зашумлена.

Типичная промышленная сеть является достаточно сложной, что приводит к неравномерной нагрузке фаз питающей сети. Практические системы используют различные однофазные нагрузки с неравномерной загрузкой распределительных линий электропередачи; нагрузки, которые отключены или включены в течение продолжительного времени и нарушают баланс напряжений в общей точке; нелинейные нагрузки, зашумляющие сеть. Дисбаланс сетевого напряжения нагружает силовую электронику и другие устройства, присутствующие на стороне потребителя. Он порождает сильные пульсации в конденсаторе звена постоянного тока, которые переходят в пульсации момента в нагрузке. Дисбаланс напряжений и возмущения, присутствующие в сети, трудно устранимы. Тем не менее, к промышленным системам предъявляются строгие требования, в том числе связанные с увеличением срока службы и производительности. Таким образом, применение активных преобразователей в таких сетях является целесообразным, однако эффективность их применения во многом зависит от качества механизма синхронизации.

### **Цели и задачи проекта**

Задача данного проекта сводится к усовершенствованию информационной подсистемы активного преобразователя для достижения энергетической эффективности при одно- и двухстороннем энергопотреблении за счет применения системы фазовой автоподстройки частоты, которая обеспечивает синхронизацию с фазой и частотой первой гармоники фазового напряжения.

В рамках данной задачи требуется:

1. Исследовать и оценить влияние гармонических искажений входного напряжения на эффективность работы активного выпрямителя напряжения.
2. Разработать систему управления трехфазным активным выпрямителем напряжения, устойчивую к гармоническим искажениям его входного напряжения.
3. Подтвердить энергоэффективность трехфазного активного выпрямителя напряжения с предложенной системой управления моделированием в пакете программ Matlab/Simulink.

## Влияние гармонических искажений на эффективность работы активного выпрямителя напряжения

### Математическая модель активного выпрямителя напряжения

Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами и обращенный на сторону сети переменного тока, который обеспечивает двунаправленный обмен энергии между питающей сетью и потребителем [1]. Неуправляемый выпрямитель (НУВ) структурно входит в состав АВН и выпрямление осуществляется через обратные диоды. В принципе работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока.

Для обмена реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник, между первичной сетью и АВН используется конденсатор силового фильтра звена постоянного тока. Моделирование энергетических подсистем электротехнических комплексов и систем с полупроводниковыми преобразователями может производиться:

1. По аналитическим выражениям или с привлечением методов расчета электрических цепей с дискретно изменяющимися параметрами, в том числе метода пространства состояний и базиса коммутационных разрывных функций, в современных интегрированных пакетах математического программирования Mathcad, Matlab.

2. На схематических моделях в пакетах OrCAD/PSpice, WorkBench.

3. На структурно-имитационных моделях в пакете Matlab/Simulink с применением приложения SymPower Systems.

Несомненное достоинство Simulink и SimPowerSystems состоит в возможности построения моделей сложных электротехнических систем на основе методов имитационного и функционального моделирования. Так, для построения силовой части полупроводникового преобразователя используются блоки SimPowerSystems, имитирующие активные или пассивные элементы и устройства, а в его системе управления – функциональные блоки Simulink, которые отражают алгоритм ее работы без представления электрической схемы. Важно отметить, что после построения функциональной модели исключается сложный этап составления и решения алгебраических и дифференциальных уравнений и обеспечивается возможность визуального контроля поведения созданной в ней модели и характера протекающих в ней процессов [2].

Схема трехфазного АВН представлена на рис. 1, где УК – управляющий контроллер.

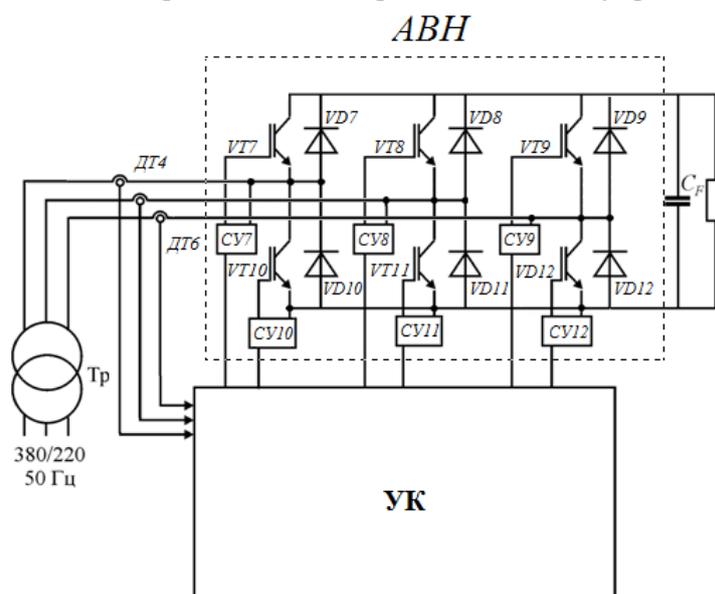


Рис. 1. Схема трехфазного активного выпрямителя

В системе управления могут решаться следующие задачи [3]:

- стабилизация выпрямленного напряжения на заданном уровне путем воздействия на амплитуду заданных фазных токов сети;
- формирование фазных токов сети, близких по форме к синусоиде путем воздействия на напряжения управления;
- поддержание заданного коэффициента мощности сети (индуктивного, емкостного или равного 1) путем воздействия на напряжения управления;
- передача энергии из сети переменного напряжения в цепь постоянного и обратно.

Следует отметить, что минимальный уровень выпрямленного напряжения в рассматриваемой схеме равен тому напряжению, которое может создать диодный выпрямитель. [3, 4].

Для описания электромагнитных процессов в системах переменного тока используются следующие системы координат: неподвижная ортогональная  $\alpha\beta$  и вращающаяся с произвольной угловой скоростью  $\omega_k$  ортогональная система координат  $xу$ . В неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ -вектор тока может быть представлен в комплексной и показательной формах:

$$\bar{i}_H = i_\alpha + j i_\beta = I_m e^{j\Psi} \quad (1)$$

Аналогично во вращающейся системе координат тот же вектор имеет вид:

$$\bar{i}_{Bp} = i_X + j i_Y = I_m e^{j(\Psi - \omega_k t)} = \bar{i}_H e^{-j\omega_k t} \quad (2)$$

Из (1) и (2) можно получить уравнения для перехода от неподвижной системы координат к вращающейся и обратно (преобразования Парка-Горева). Если принять, что  $I_x$  и  $I_y$  – соответственно активная и реактивная составляющие обобщенного вектора сетевого тока и система синхронизирована относительно синусоиды электродвижущая сила (ЭДС) фазы А, то получим систему уравнений:

$$i_\alpha = i_X \sin(\omega_k t) + i_Y \cos(\omega_k t) \quad (3)$$

$$i_\beta = -i_X \cos(\omega_k t) + i_Y \sin(\omega_k t) \quad (4)$$

Преобразование двухфазной неподвижной системы координат в трехфазную в этом случае осуществляется в соответствии с выражениями (преобразования Кларка):

$$i_A = i_\alpha, \quad i_B = -(1/2)i_\alpha + (\sqrt{3}/2)i_\beta, \quad i_C = -(1/2)i_\alpha - (\sqrt{3}/2)i_\beta \quad (5)$$

С помощью преобразования координат появляется возможность управлять АВН отдельно по проекциям  $I_x$  и  $I_y$  обобщенного вектора сетевого тока (рис. 1). Положительным значениям  $I_x$  соответствует режим потребления энергии из первичной сети, отрицательным – режим рекуперации. Таким образом, переход от двигательного режима в генераторный и обратно осуществляется в такой системе автоматически.

Система подчиненного регулирования АВН с отдельным управлением по проекциям обобщенного вектора сетевого тока (внутренний контур тока) и внешним контуром стабилизации напряжения конденсатора силового фильтра (СФ) звена постоянного тока (ЗПТ) представлена на рис. 2. Помимо вышеперечисленных блоков в систему входят пропорциональный регулятор (П-регулятор) контура стабилизации напряжения  $U_c$  конденсатора СФ ЗПТ и блок токоограничения, который является обязательным элементом системы регулирования АВН. Он позволяет ограничить электромагнитные нагрузки на элементы АВН на заданном уровне.

Модель АВН, реализованная в пакете Matlab\Simulink, приведена на рис. 3. Во избежание существенного завышения установленных мощностей оборудования АВН его регулирование следует начинать после окончания переходного процесса, вызванного включением в питающую сеть. При пуске ток заряда конденсатора СФ протекает через НУВ, структурно входящий в схему АВН, в результате при пуске наблюдаются процессы аналогичные процессам в традиционных выпрямителях. В модели (рис. 3) на стороне переменного тока установлен блок пусковых резисторов, который предназначен для

ограничения тока заряда конденсатора СФ. Спустя заданное время после момента включения в питающую сеть пусковые резисторы автоматически шунтируются контактором или реле, и потерь мощности при дальнейшей работе АВН в них нет.

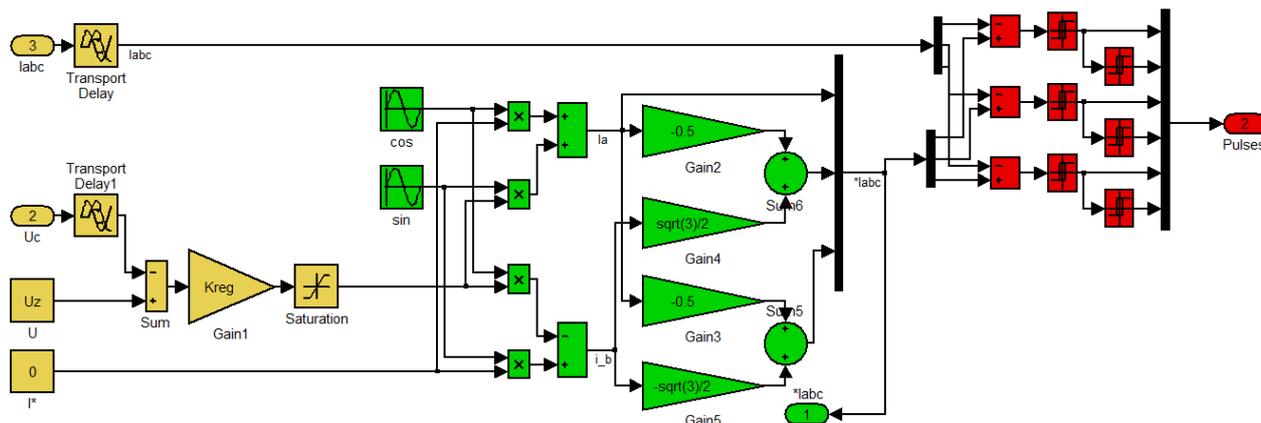


Рис. 2. Система подчиненного регулирования АВН

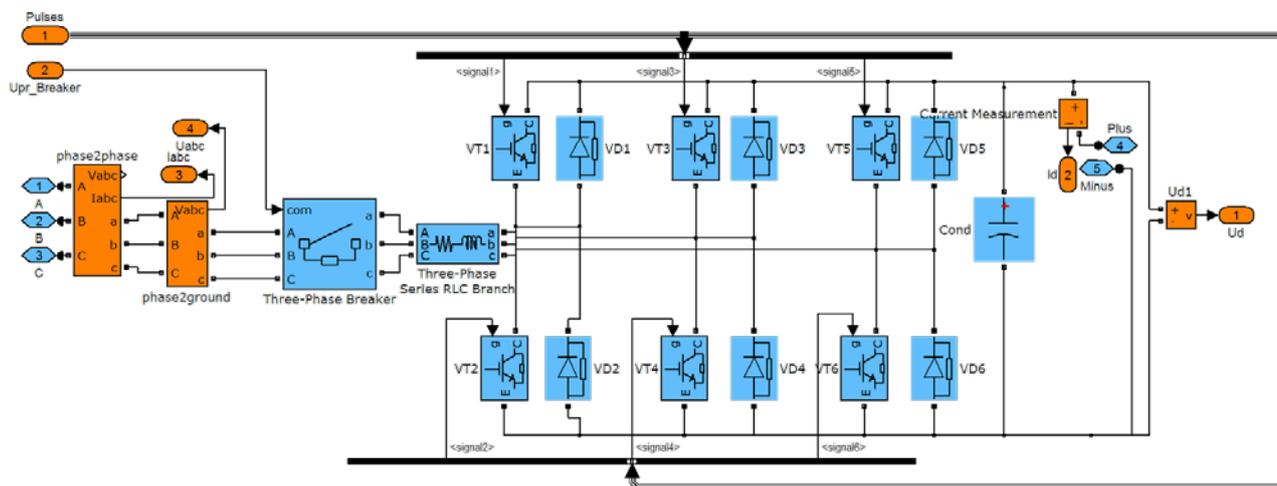


Рис. 3. Модель активного выпрямителя напряжения

Результаты моделирования электромагнитных процессов в АВН представлены на рис. 4, где  $u_a, i_a, u_b, i_b, u_c, i_c$  – сетевые фазные напряжения и токи,  $i_d$  – ток в нагрузке. Параметры моделирования: частота сетевого напряжения  $f_s = 50$  Гц,  $U_n = 380$  В, внутреннее сопротивление фазы сети  $R = 0,1$  Ом; сопротивление пусковых резисторов  $R_n = 5$  Ом; индуктивность и активное сопротивление фазы токоограничивающего сетевого реактора  $L_p = 5$  мГн,  $R_p = 0,4$  Ом; активное сопротивление и индуктивность нагрузки  $R_d = 20$  Ом,  $L_d = 50$  мГн, противоЭДС нагрузки  $E = 1000$  В (в режиме рекуперации); емкость конденсатора СФ  $C_f = 2$  мФ; напряжение стабилизации  $U_c = 600$  В. Уровень ограничения амплитуды сетевого тока 50 А (в режиме потребления мощности), -50 А (в режиме рекуперации). Коэффициент П-регулятора  $K_n = 3$  выбирался по результатам моделирования по параметрам автоколебаний, возникающих в замкнутой системе (метод Циглера-Николса).

При моделировании в момент времени  $t = 0,06$  с в блоке «3-Phase Breaker» шунтируются пусковые резисторы. АВН вступает в работу в момент  $t = 0,12$  с, при этом ЭДС нагрузки равна нулю. АВН переходит из режима потребления энергии в режим рекуперации при  $t = 0,18$  с, когда подается противоЭДС нагрузки равная 1000 В. АВН возвращается в режим потребления энергии из первичной сети в момент  $t = 0,24$  с, когда ЭДС нагрузки становится равной нулю.

На модели были проведены измерения полной мощности  $S$  и ее составляющих:  $P$  – активной,  $Q$  – реактивной,  $T$  – искажения,  $H$  – не симметрии, мощностей трехфазных трех проводных несимметричных энергоподсистем, а также вычислены показатели качества энергопотребления. В результате моделирования для режима потребления энергии из сети получены следующие величины:  $S = 18\ 786$  В·А,  $P = 18\ 784$  Вт,  $Q = -13$  В·Ар,  $T = 222$  В·А,

$H = 25 \text{ В} \cdot \text{А}$ , при этом  $K_{\text{мощности}} = P / S$ ,  $K_{\text{сдвига}} = P / \sqrt{P^2 + Q^2}$ ,  
 $K_{\text{искажения}} = \sqrt{P^2 + Q^2} / \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}$ ,  $K_{\text{несимметрии}} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} / S$  равны 1,  
 $K_{\text{гармоник}} (THD) = T / \sqrt{P^2 + Q^2}$  составил 0,012 (1,2 %),  $KПД = P_d / P = 0,916$  (определяется потерями в сетевом реакторе).

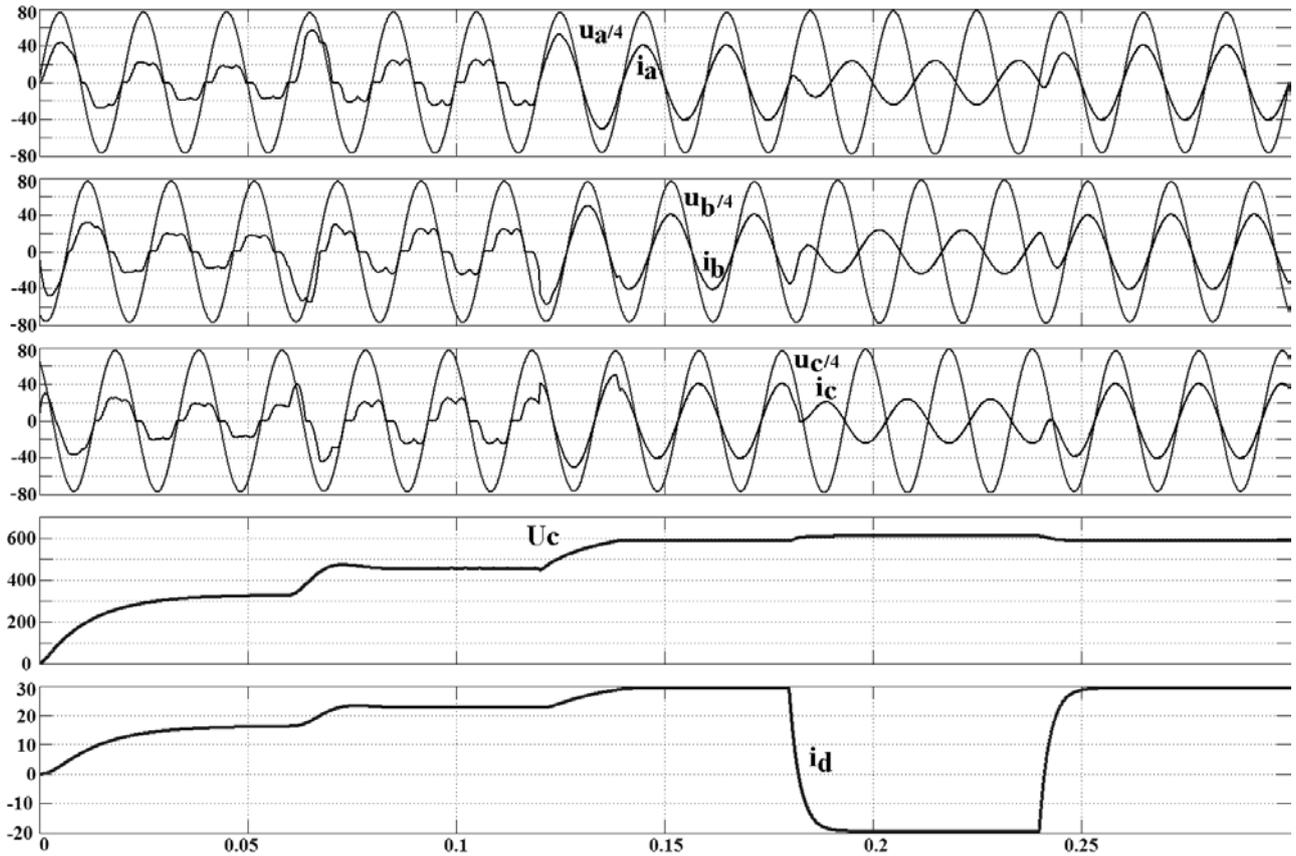


Рис. 4. Результаты моделирования электромагнитных процессов в АВН: (сверху вниз) ( $u_a/4, \text{В}, i_a, \text{А}$ ); ( $u_b/4, \text{В}, i_b, \text{А}$ ); ( $u_c/4, \text{В}, i_c, \text{А}$ );  $U_c, \text{В}$ ;  $i_d, \text{А}$

### Оценка влияния искажений сетевого напряжения на работу активного выпрямителя

На модели АВН, изображенной на рис. 3, было проведено моделирование работы системы в условиях синусоидального и несинусоидального напряжения питающей сети.

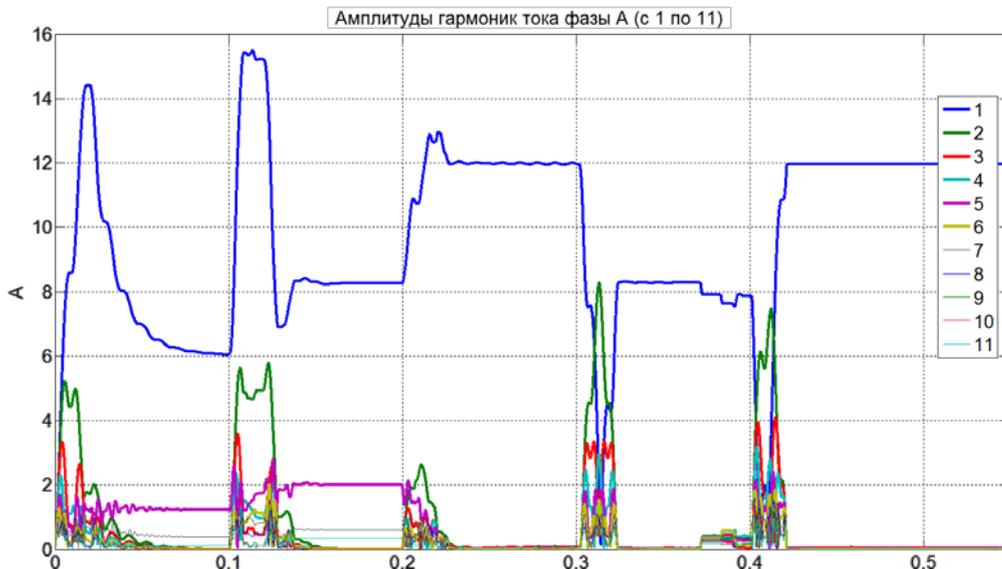


Рис. 5. Гармонический состав тока в фазе питающей сети при синусоидальном напряжении

При моделировании в момент времени  $t = 0,01$  с шунтируются пусковые резисторы. АВН вступает в работу в момент  $t = 0,2$  с, при этом ЭДС нагрузки равна нулю. Таким образом, первые  $0,2$  с могут рассматриваться в качестве примера работы неуправляемого выпрямителя. АВН переходит из режима потребления энергии в режим рекуперации при  $t = 0,3$  с, когда подается противоЭДС нагрузки равная  $1000$  В. АВН возвращается в режим потребления энергии из первичной сети в момент  $t = 0,4$  с, когда ЭДС нагрузки становится равной нулю.

Результаты моделирования показывают, что при синусоидальном напряжении в фазе сети АВН способен устранить высшие гармоники тока в фазе. Их наличие будет обуславливаться максимально возможной частотой коммутации ключей и шириной гистерезиса релейного регулятора тока.

Для моделирования несинусоидального напряжения использовался сигнал, изображенный на рис. 6.

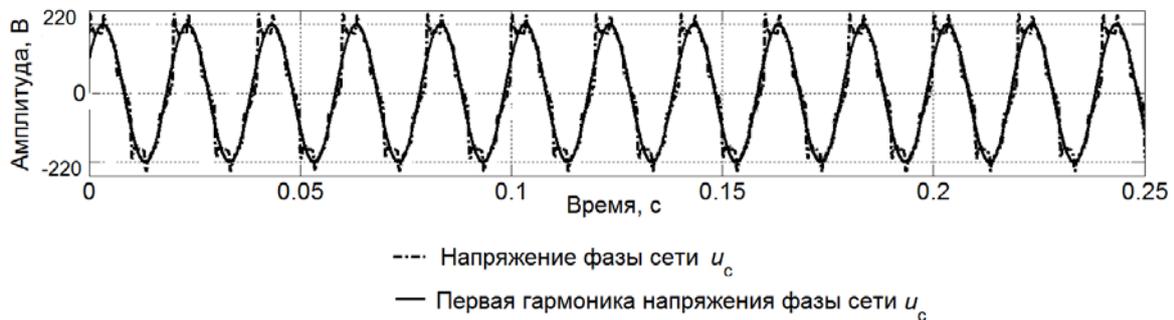


Рис. 6. Моделируемое несинусоидальное напряжение сети и первая гармоника моделируемого напряжения

При несинусоидальном фазном напряжении АВН, с учетом синхронизации с питающей сетью, способен обеспечивать существенное улучшение гармонического состава тока в фазе питающей сети по сравнению с неуправляемым выпрямителем, при условии синхронизации с первой гармоникой фазного напряжения (рис. 7).

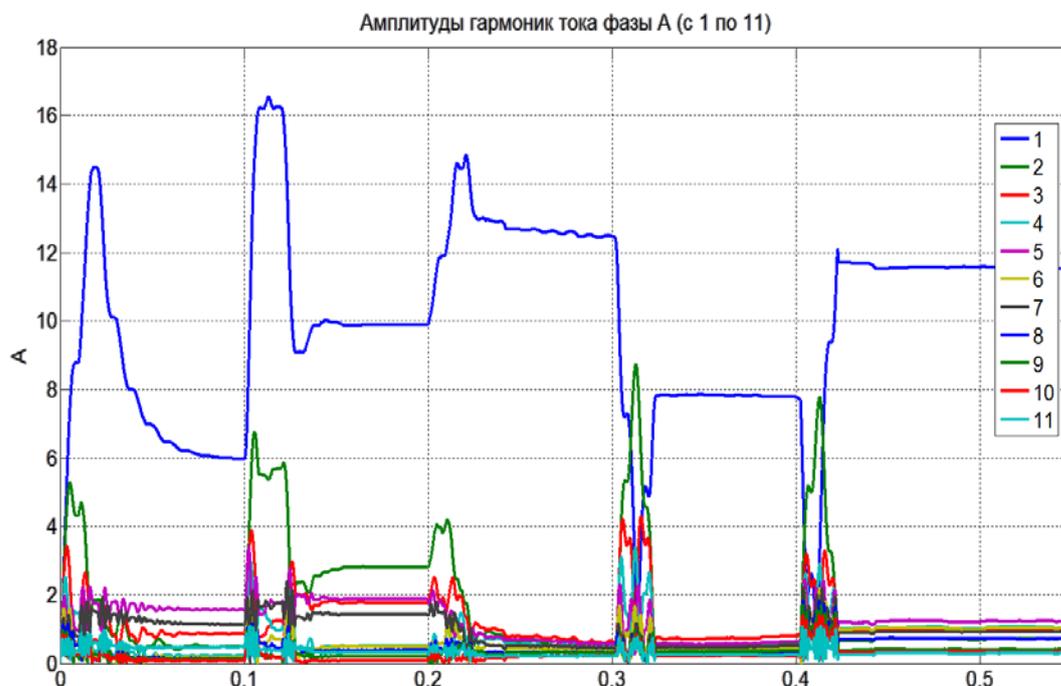


Рис. 7. Гармонический состав тока в фазе питающей сети при несинусоидальном напряжении

## Разработка системы управления активным выпрямителем напряжения, устойчивой к искажениям сетевого напряжения

Для достижения энергетической эффективности систем с трехфазными АВН на систему управления трехфазным АВН возлагается ряд задач, решение которых связано с необходимостью нахождения фазы или фазовой синхронизацией. Одной из таких задач является коррекция коэффициента мощности. Она осуществляется за счет формирования сигнала задания синусоидальной формы, синфазного с напряжением в фазе питающей сети для контура тока системы управления АВН. В связи с этим, в информационной подсистеме преобразователя необходимо обеспечивать фазовую автоподстройку частоты для синхронизации с фазой и частотой первой гармоники фазового напряжения [5]. С учетом неидеального характера питающей сети критерием для выбора полосы пропускания на выходе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в устройствах управления АВН должно быть отсутствие высших гармоник тока, превышающих требования ГОСТ.

Построение систем ФАПЧ, получивших широкое распространение в устройствах передачи данных для обеспечения синхронной работы приемной и передающей аппаратуры, не является принципиально новой задачей. Известен ряд способов [6], реализуемых, как правило, в рамках радиоэлектроники, однако описание синтеза ФАПЧ в них осуществляется с использованием передаточных функций. Особенностью предлагаемой методики является применение метода пространства состояний. Это позволяет в максимальной степени использовать существующие математические пакеты прикладных программ, такие как Matlab, Mathcad и другие, обеспечивая высокую эффективность процедуры проектирования.

### Описание структуры системы фазовой автоподстройки частоты

Функциональная схема типовой системы ФАПЧ представлена на рис. 8. Она включает в себя: фазовый дискриминатор (ФД), фильтр низких частот (ФНЧ), управляемый генератор (УГ) и устройство управления (УУ) – регулятор, придающий системе желаемые динамические свойства. На УУ также поступает так называемая уставка по частоте или начальная частота генератора  $\omega_r$ . Введение ее уменьшает рассогласование по частоте и улучшает условия захвата.

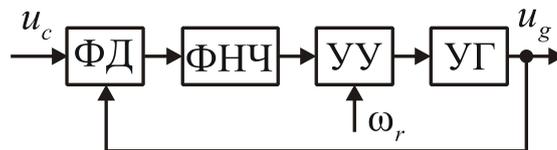


Рис. 8. Функциональная схема системы ФАПЧ

ФД осуществляет сравнение фаз входного сигнала  $\varphi_c$ , в нашем случае сигнал питающей сети с частотой 49–51 Гц, и выходного сигнала  $\varphi_g$ , генерируемого УГ. Простейший ФД представляет собой блок произведения сигналов сети и генератора. Пусть сигналы питающей сети и УГ соответственно представлены уравнениями:

$$u_c(t) = U_c \sin(\omega_c t), \quad (6)$$

$$u_g(t) = U_g \cos(\omega_g t) = U_g \cos((\omega_c - \delta)t), \quad (7)$$

где  $\omega_c$  – частота сети, рад/с, а частота УГ  $\omega_g$  отличается от частоты сети  $\omega_c$  на величину  $\delta$ .

Тогда произведение этих сигналов описывается выражением:

$$u_c \times u_g = K_d (\sin(\delta t) + \sin((2\omega_c - \delta)t)), \quad (8)$$

где  $K_d = \frac{U_c U_g}{2}$  – коэффициент усиления фазового дискриминатора.

ФНЧ, в качестве которого может выступать апериодическое звено первого порядка с постоянной времени  $T_f$ , подавляет составляющую сигнала двойной частоты. Низкочастотная составляющая сигнала с ФД при малых значениях аргумента равна разности фаз  $\delta t$ .

Неуправляемый генератор синусоидального воздействия описывается однородным дифференциальным уравнением с начальными условиями  $f_0$ :

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \omega_g^2 f = 0 \tag{9}$$

Эквивалентные структурные схемы генераторов представлены на рис. 9.



Рис. 9. Структурные схемы генератора: а – неуправляемого; б – управляемого

Частота сигнала на выходе УГ задается с помощью блоков произведения, а амплитуда – начальными условиями на одном из интеграторов. Изменяя частоту генератора, можно добиться синфазности с сигналом сети.

### Синтез системы управления для управляемого генератора

На рис. 10 представлена расчетная схема системы ФАПЧ. При переходе к ней модель УГ заменяется интегратором, так как в установившемся режиме на входе генератора – постоянная частота, а на выходе – гармоническая функция, характеризующаяся линейно изменяющейся фазой, следовательно, фаза колебаний является интегралом частоты. В такой системе, для получения нулевого значения установившейся ошибки по фазе, необходимо обеспечить астатизм второго порядка, поэтому в канал прямой связи последовательно с аperiодическим звеном введен дополнительный интегратор с переменной  $x_2$  на выходе.

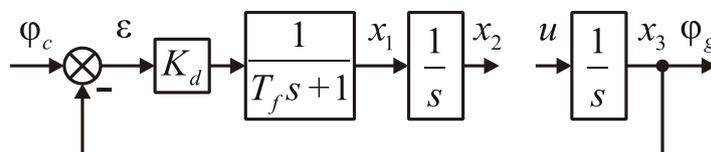


Рис 10. Расчетная схема ФАПЧ

Эта расчетная схема описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{T_f} x_1 + \frac{K_d}{T_f} \varepsilon, \\ \dot{x}_2 = x_1, \\ \dot{x}_3 = u, \end{cases} \tag{10}$$

где  $\varepsilon = \varphi_c - x_3$ .

Произведем замену переменной  $x_3 = \varphi_c - \delta$ , тогда (10) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{T_f} x_1 + \frac{K_d}{T_f} \varepsilon, \\ \dot{x}_2 = x_1, \\ \dot{\varepsilon} = \omega_c - \dot{x}_3 = \beta. \end{cases} \tag{11}$$

Для полученной системы синтезируем регулятор состояния

$$\beta = -Kx, \tag{12}$$

где  $K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3]$ , а  $x = [x_1 \quad x_2 \quad \varepsilon]^T$ .

Методика расчета коэффициентов матрицы  $K$  приводится в работах [7, 8]. Возвратившись к переменной  $x_3$ , преобразуем расчетную схему к виду, изображенному на рис. 11.

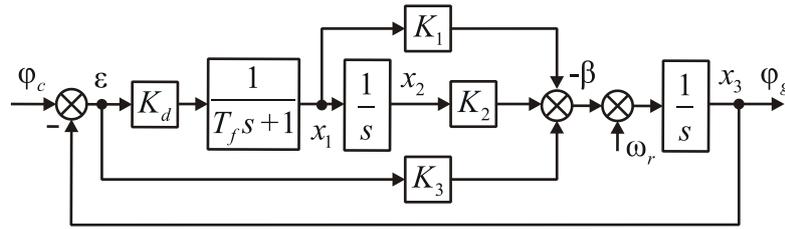


Рис. 11. Расчетная схема ФАПЧ с регулятором состояния

Ошибка по фазе не поддается непосредственному измерению, для ее оценки может быть использован наблюдатель пониженной размерности [9].

Преобразуем закон управления (12) следующим образом:

$$-Kx(t) = N_1 y(t) + N_2 \tilde{w}(t), \tag{13}$$

где  $y(t) = Cx(t)$  – вектор измеряемых переменных состояния,  $\tilde{w}(t) = Tx(t)$  – вектор оцениваемых переменных состояния, матрица  $T$  пока неизвестна.

Уравнение (13) справедливо при любых  $x(t)$ , если

$$-K = N_1 C + N_2 T = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Из выражения (14) находим

$$\begin{bmatrix} N_1 & N_2 \end{bmatrix} = -K \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}^{-1}.$$

Следовательно, выполнение закона (8) может быть выполнено после определения матрицы  $T$ .

Уравнение состояния наблюдателя пониженной размерности имеет следующий вид:

$$\dot{\tilde{w}} = A_n \tilde{w} + B_n \beta + R_n y, \tag{15}$$

где  $B_n = TB$  – матрица входа наблюдателя по управлению.

Матрица состояния наблюдателя  $A_n$  должна быть гурвицевой, порядок ее соответствует числу наблюдаемых переменных. Матрица входа наблюдателя по измеряемым переменным  $R_n$  выбирается из условия управляемости наблюдателя.

Матрица  $T$  находится в результате решения уравнения Сильвестра [9]:  $TA - A_n T = RC$ .

Теперь подставим (13) в (15) и получим новое уравнение состояния наблюдателя, на вход которого уже не подается сигнал управления:

$$\dot{\tilde{w}} = A_n \tilde{w} + R_n y, \tag{16}$$

где  $F_n = A_n + B_n N_2$ ,  $L_n = R_n + B_n N_1$  – новые матрицы состояния и входа по измеряемым переменным состояния.

Итоговая функциональная схема системы ФАПЧ представлена на рис. 12. Модель системы управления приведена к виду, изображенному на рис. 13. Устройство блоков ФАПЧ соответствует структуре, представленной на рис. 12.

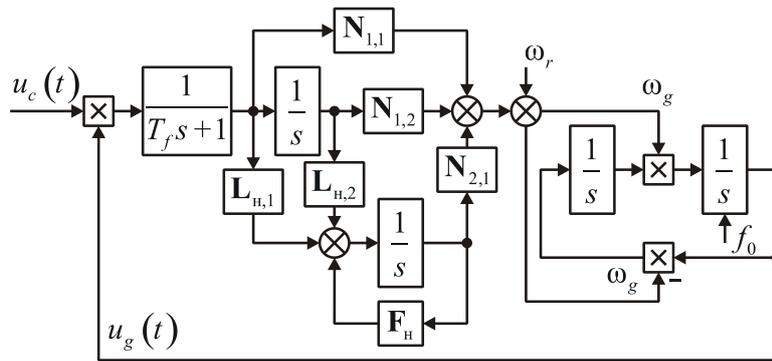


Рис. 12. Функциональная схема системы ФАПЧ с системой управления

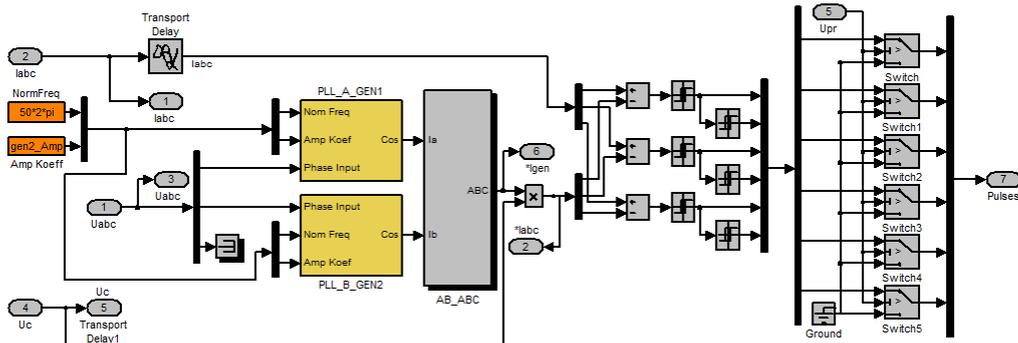


Рис. 13. Модель системы управления трехфазным АВН, включающей механизм синхронизации с питающей сетью

Создание модели активного выпрямителя напряжения с предлагаемой системой управления в среде Matlab/Simulink

**Результаты моделирования системы фазовой автоподстройки частоты**

Для моделирования постоянная времени ФНЧ  $T_f$  выбиралась, исходя из требования подавления высшей гармонической составляющей с частотой 100 Гц. Уставка равна эталонной частоте промышленной сети 50 Гц (рис. 14).

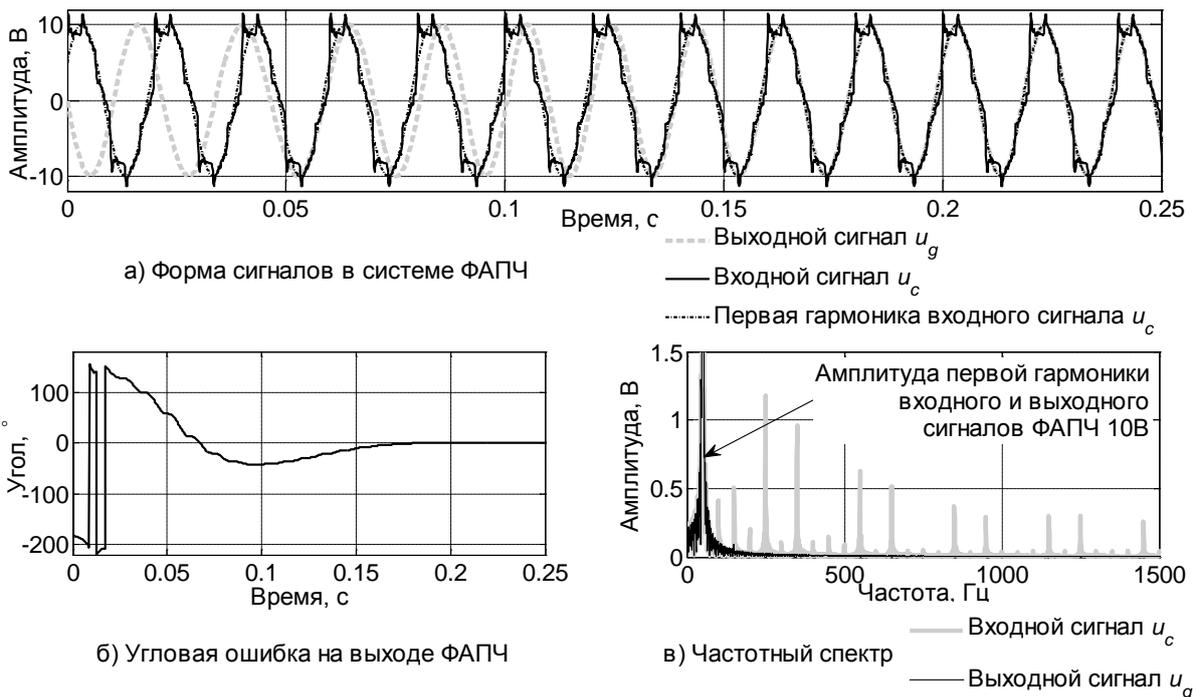


Рис. 14. Результаты моделирования системы ФАПЧ

В системе ФАПЧ при увеличении полосы пропускания уменьшается время переходного процесса. При этом увеличивается чувствительность ФАПЧ к высшим гармоникам в напряжении питающей сети и, следовательно, увеличивается ошибка. Синтезированная система ФАПЧ удовлетворяет требованию подавления гармонических составляющих с частотой 100 Гц и выше при полосе пропускания 50 рад/с и обеспечивает захват фазы через 0,16 с, то есть за восемь периодов напряжения питающей сети.

### Результаты моделирования работы трехфазного активного выпрямителя напряжения с синтезированной системой фазовой автоподстройки частоты

Для моделирования трехфазного АВН с синтезированной системой ФАПЧ была использована модель АВН, аналогичная описанной в [1, 5]. Время синхронизации с питающей сетью составляет 0,16 с, процесс синхронизации не отличается от приведенного на рис. 12. АВН вступает в работу в момент  $t = 0,16$  с. Результаты моделирования системы представлены на рис. 15.

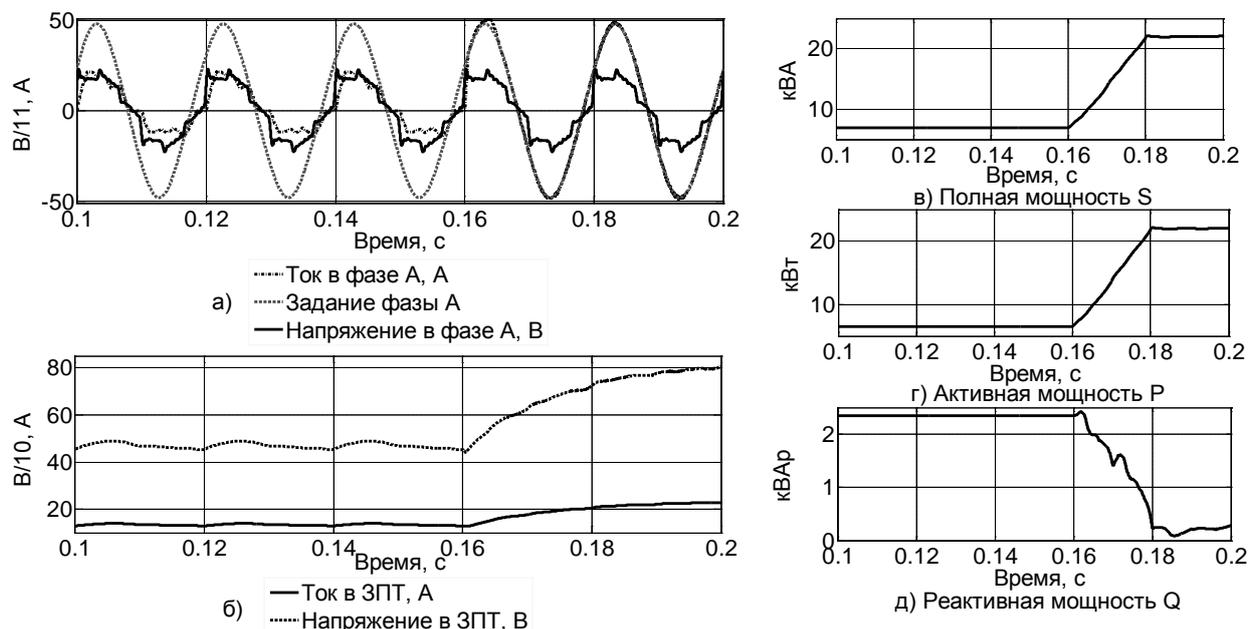


Рис. 15. Результаты моделирования АВН с синтезированной системой ФАПЧ

Результаты моделирования показывают, что по окончании переходного процесса после включения АВН реактивная мощность системы снижается до уровня менее 10 % от первоначального.

### Использованные методы

В работе использовались методы теории автоматического управления, теории электропривода и гармонического анализа.

Применены основы теории преобразовательной техники, математическое моделирование в среде Matlab/Simulink.

### Основные достигнутые результаты

Синтезирована система ФАПЧ с использованием формализма пространства состояний.

Она внедрена в систему управления АВН в качестве механизма синхронизации с питающей сетью и способна подавлять высшие гармоники входного сигнала при полосе пропускания 50 рад/с и меньше.

Разработана система управления АВН с ФАПЧ, которая позволяет осуществить компенсацию реактивной составляющей мощности и корректировать форму тока в фазах питающей сети

С помощью компьютерного моделирования в среде Matlab/Simulink показана устойчивость данной системы к искажениям гармонического состава напряжения питающей сети.

### Области возможного использования результатов

Теоретическая значимость проекта состоит в развитии технологий создания энергоэффективных полупроводниковых преобразователей для систем электроприводов как постоянного, так и переменного тока с обратимым характером энергопотребления.

Практическая значимость данного проекта состоит в разработке системы управления полупроводниковым преобразователем, которая обеспечивает отсутствие реактивной составляющей полной мощности при работе в неидеальной сети, с возможной минимизацией требований к вычислительным ресурсам микроконтроллера.

### Публикации

1. *Борисов П.А., Поляков Н.А., Киреев А.А.* Моделирование системы управления трехфазным активным выпрямителем напряжения с преобразованием координат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 2. С. 59–64.
2. *Поляков Н.А.* Исследование трехфазных активных выпрямителей напряжения в системах автоматизированного электропривода // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. СПб., 2011. С. 42–44.
3. *Поляков Н.А., Борисов П.А.* Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 55–60.
4. *Поляков Н.А., Борисов П.А., Томасов В.С.* Определение параметров элементов энергоподсистемы замкнутой системы электропривода ШИП-ДПТ // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП – 2012; Иваново, 2–4 октября 2012 г.). Иваново, 2012. С. 217–224.
5. *Поляков Н.А.* Оценка влияния трехфазного активного выпрямителя напряжения на гармонический состав сетевого тока и составляющие полной мощности сети при несинусоидальных фазных напряжениях // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 226–227.

### Литература

1. *Борисов П.А., Поляков Н.А., Киреев А.А.* Моделирование системы управления трехфазным активным выпрямителем напряжения с преобразованием координат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 2. С. 59–64.
2. *Худяков В.Ф., Хабuzов В.А.* Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB 7.x: Учебное пособие. СПб., 2008. – 332 с.
3. *Пронин М.В., Воронцов А.Г.* Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб., 2003. – 172 с.
4. *Шрейнер Р.Т.* Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург, 2000. – 654 с.
5. *Поляков Н.А., Борисов П.А.* Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 55–60.
6. *Григорьев В.В., Дроздов В.Н., Сабинин Ю.А. и др.* Импульсные системы фазовой автоподстройки частоты. Л., 1982. – 88 с.
7. *Абдуллин А.А., Дроздов В.Н.* Синтез алгоритма управления прецизионного следящего электропривода // Труды VII Международной (VIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП — 2012; Иваново, 2–4 октября 2012 г.). Иваново, 2012. С. 208–212.

8. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Анализ робастности неадаптивной системы управления электропривода с вариациями структуры и параметров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 40–44.
9. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М., 1976. – 184 с.



**Ротц Юлия Андреевна**  
**Факультет точной механики и технологий**  
**Кафедра мехатроники**  
**E-mail: leadensky@yandex.ru**

## **РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ**

Ю.А. Ротц

Научный руководитель – профессор В.М. Мусалимов

### **Введение**

Зрительная работоспособность (ЗР) – это способность выполнять зрительную работу и поддерживать высокую степень мобилизации зрительных функций за определенный промежуток времени. Она влияет на производительность труда и качество работы. Определение параметров ЗР является крайне актуальной задачей при профессиональном отборе.

Динамическая острота зрения (ДОЗ) – способность глаза воспринимать и различать детали движущихся объектов, устанавливать скорость и направление их движения. Это способность визуально «схватить и удержать» изображение предмета на время, достаточное для того, чтобы увидеть его детали (измеряется в мс.). ДОЗ – важный показатель зрительной работоспособности лиц, связанных с восприятием движущихся объектов (летчиков, космонавтов, спортсменов и др.) [1, 2].

ДОЗ может уменьшаться: при снижении статической остроты зрения (СОЗ), нарушении плавности движений глаз, с возрастом, при повышении скорости движения наблюдаемого объекта, бессоннице, физической нагрузке, утомлении.

Широкое применение методов оценки ДОЗ сдерживается отсутствием специального оборудования, стандартизованных методов, нормативных показателей и другими причинами. Кроме того, мало изучены механизмы мозга, отвечающие за ДОЗ.

Цель проекта – разработка методов оценки ДОЗ и проведение измерений величины ДОЗ у группы взрослых людей с различными физическими данными, а также статистический и регрессионный анализ полученных данных.

### **Тестовые группы**

Исследуемые группы взрослых состояли из лиц, не имеющих психологических и неврологических заболеваний. У испытуемых не наблюдалось также симптомов отклонений работы вестибулярного аппарата. Среди них были люди с нормальной СОЗ и отклонениями от нее (близорукость, возрастная дальнозоркость). Для последних испытание проводилось как в условиях естественного видения, так и при коррекции зрения с помощью линз. Профессии большинства испытуемых были связаны с длительной работой за ПК. Среди них были люди занимающиеся спортом, в частности – гонщики.

Для способа измерения, заключающегося в видеорегистрации движений глаз, величина ДОЗ была измерена у девяти испытуемых (10 измерений для каждого). Их возрастная категория составила 23–35 лет, средний возраст группы 26 лет и 6 месяцев (СКО = 4,6).

Измерение величины ДОЗ прибором с цилиндром опто типов было выполнено у группы из 42 человек (20 мужчин и 22 женщины). Возрастная категория основной группы составила 21–32 года, возраст пяти испытуемых превышал 50 лет. Средний возраст основной группы 25 лет (СКО = 2,95), а всей группы – 31 год и 3 месяца (СКО = 11,92). У лиц старше 50 лет величина ДОЗ была измерена отдельно для оценки влияния возраста на ее величину. Алгоритм измерений был общим для всех групп.

## Метод видеорегистрации движений глаз

### Конструкция и принцип действия устройства

Автором проекта была создана установка для оценки ДОЗ (рис. 1). Она содержит шаблон для бесконтактных измерений 1, высокоскоростную камеру 2, подключенную к компьютеру 3, через фреймграббер 4, два боковых экрана для предъявления опто типов 5, устройство обработки информации 3 (компьютер с пакетом прикладных программ Matlab и программой обработки изображений Osprey [3]).

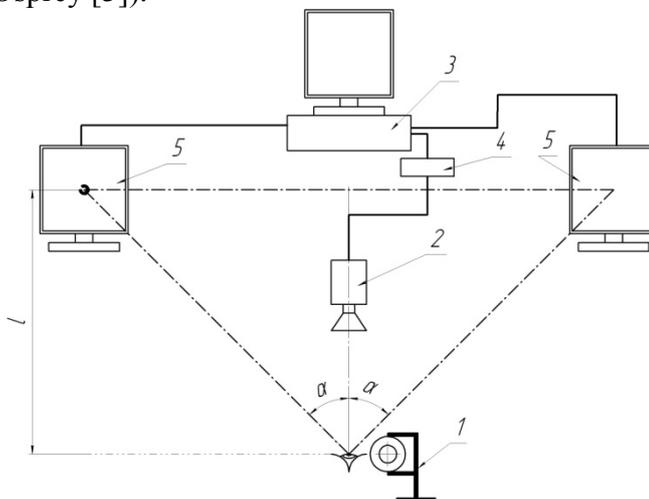


Рис. 1 Схема установки для реализации способа определения динамической остроты зрения

Метод реализуется следующим образом. Испытуемый усаживается перед высокоскоростной камерой. Его голова фиксируется в определенном положении. Соблюдается постоянное расстояние от глаза до объектива камеры, которая располагается по высоте на уровне глаз.

Испытуемого просят выполнить задание: зафиксировать взгляд на одной точке не моргая, затем по команде перевести взгляд из точки фиксации на опто тип, который появлялся на одном из боковых экранов в момент начала теста, распознать его за максимально короткое время и перевести взгляд в исходное положение. Начало записи изображений синхронизировано с началом теста.

После выполнения задания анализируется правильность ответов. Если испытуемый правильно идентифицирует опто тип, то серия полученных снимков подлежит дальнейшей обработке. По итогам измерений сформированы массивы значений положения центра зрачка (ЦЗ) при перемещении его по определенной тестом траектории.

### Алгоритм математической обработки данных

По видеоряду, состоящему из отдельных кадров, анализируется траектория движения центра зрачка, соответствующая правильной идентификации опто типа. Далее для бесконтактных измерений на кадре (рис. 2) определяется положение центра шаблона, размещаемого при измерениях рядом с глазом испытуемого, и принимается за начало

координат. Для перехода от абсолютных единиц к единицам длины измеряется диаметр шаблона на кадре и вычисляется коэффициент масштаба  $k$  по выражению:

$$k = \frac{d_p}{d_k}, \quad (1)$$

где  $d_p$  – реальный диаметр шаблона,  $d_k$  – диаметр шаблона на кадре.

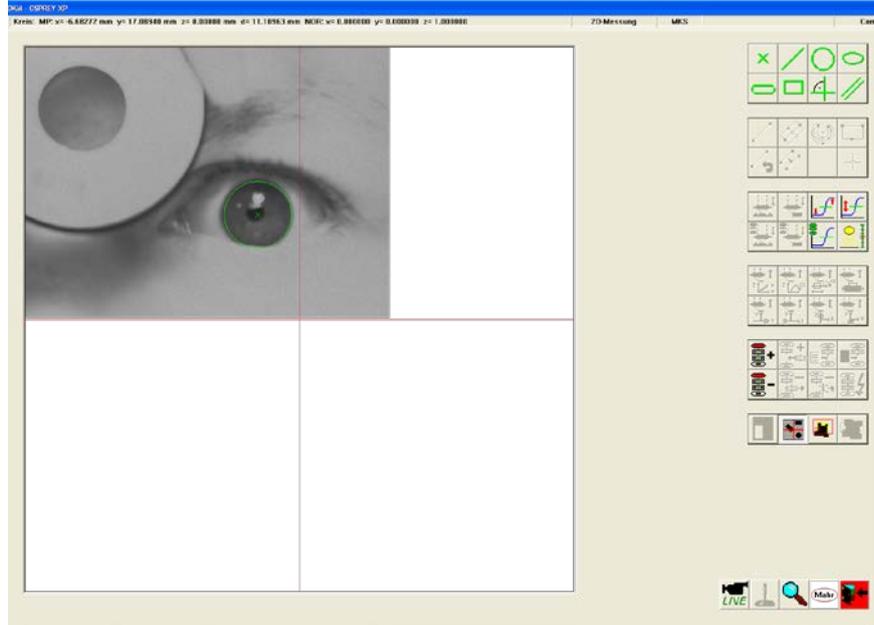


Рис. 2 Обработка изображений в программе Osprey

На следующем этапе определяется координата  $x_n$  положения зрачка на каждом кадре относительно начала координат и формируется массив  $X$  значений координат зрачка. Затем для каждого кадра вычисляется отклонение координаты зрачка относительно первого кадра  $\Delta x_n$  по выражению:

$$\Delta x_n = k \cdot (x_0 + (x_n - x_1)), \quad (2)$$

где  $x_0$  – начало координат,  $x_1$  – координата зрачка на первом кадре,  $x_n$  – координата зрачка на последующих кадрах,  $n = 1, 2, \dots$  – номер кадра.

Были сформированы массивы координат центра зрачка при его перемещении по определенной тестом траектории, радиуса радужной оболочки глаза испытуемого, отклонения его формы и др.

Далее определяется максимальное значение перемещения центра зрачка  $\Delta x_{\max}$ , соответствующего элементу массива отклонений положения зрачка  $\Delta X$ . Область исходного положения и максимального отклонения центра зрачка  $\varepsilon$  определяется по выражению:

$$\varepsilon = x_1 + \left| \frac{5 \cdot \Delta x_{\max}}{100} \right|. \quad (3)$$

Для каждого кадра измеряется время, затраченное на перемещение центра зрачка на координату  $x_n$ , формируется массив  $T$  значений времени, каждый элемент которого имеет соответствие элементу массива  $X$ . За величину ДОЗ принимается время, затраченное на реакцию нервной системы, перемещение центра зрачка из начальных координат на оптотип и на его распознавание:

$$t = t_{PNC} + t_{овиж.} + t_{зад} = 65 + 32 + 272 \text{ мс} [4, 5],$$

В результате измерений получили следующие данные: время реакции нервной системы испытуемого составляет 65 мс (4–5 кадров); характеристика глазодвигательной функции – 32–50 мс (3–5 кадров); фиксация взгляда на опто типе (скорость обработки визуальной информации) – 175 мс (13 кадров).

### Статистический анализ результатов измерений

Программа в Matlab, разработанная автором, позволяет вычислить количество кадров, соответствующих каждому этапу выполнения задания испытуемым. Она выдает номер кадра, представляющего интерес для измерения, по которому проверяется время его записи относительно начала эксперимента.

Как отмечалось, среднее значение ДОЗ, измеренное с применением способа видеорегистрации движений глаз у девяти человек, составило 272 мс.

Для аппроксимации экспериментальных данных по критерию согласия Колмогорова лучше всего подходит распределение Вейбулла (параметр масштаба  $A = 9,221$ ; параметр формы  $B = 1,044$ ). Критический уровень значимости для него равен 0,847.

Графически обработанные данные представляются в виде гистограммы распределения величины ДОЗ с наложением огибающих, наиболее распространенных статистических законов (рис. 3).

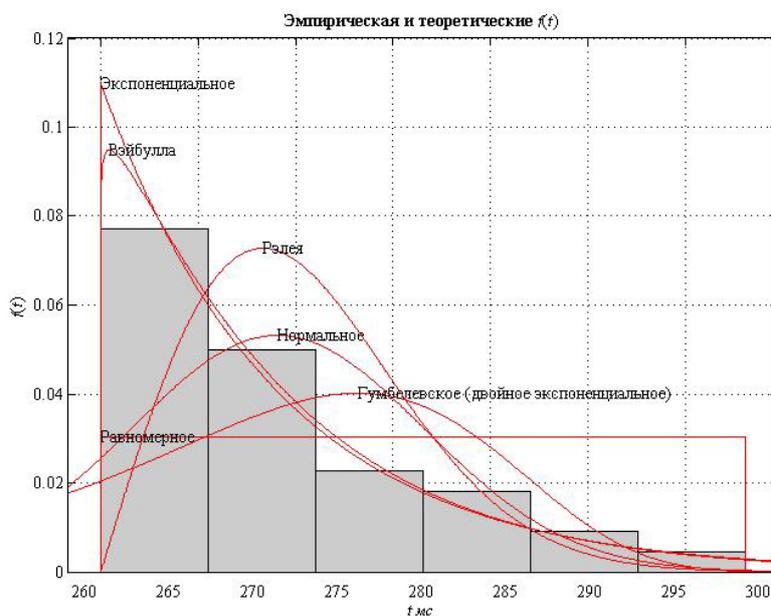


Рис. 3. Распределение ДОЗ (среднее значение 272 мс)

Отдельно приведено наложение функции распределения экспериментальных данных на эмпирическую функцию (рис. 4).

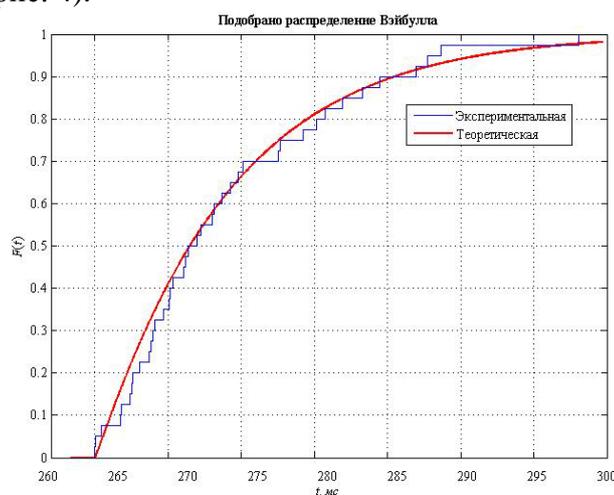


Рис. 4. Соответствие распределения ДОЗ закону Вейбулла

### Сопутствующие измерения

За счет обработки информации о траектории движения центра зрачка и ее связи с временными характеристиками окуломоторной активности можно определить маршруты движений глаз, число и длительность фиксаций элементов стимульной ситуации. О характеристике глазодвигательной функции испытуемого можно судить по времени

движения взгляда и его направлении относительно исходного положения; о скорости обработки визуальной информации – по времени задержки взгляда на опто типе. Был обозначен круг зрительных функций, к измерению которых можно адаптировать установку (Табл. 1).

Таблица 1

Возможности измерительной установки

Характеристика	Вид стимула	Значимый кадр
Скорость простой зрительно-моторной реакции (ПЗМР)	Статичный простой опто тип	Первый кадр; кадр, возвращения взгляда ЦЗ в исходное положение
Скорость сложной зрительно-моторной (СЗМР) реакции	Статичный сложный опто тип	Первый кадр; кадр, возвращения взгляда ЦЗ в исходное положение
Минимальный временной интервал различения (МВИ);	Два последовательных стимула на разных угловых расстояниях (простой опто тип);	Первый кадр; кадр перемещения взгляда на опто тип, появившийся первым
Маршруты движений глаз относительно поверхности объекта	Сложный опто тип больших угловых размеров	Сопоставление координат ЦЗ на каждом кадре контуру опто типа
Число и длительность зрительных фиксаций элементов больших угловых размеров (свыше 2-3 угл. град.)	Сложный опто тип больших угловых размеров	Группы кадров с неизменной координатой ЦЗ
Скорость реакции нервной системы	Сигнал к началу эксперимента	Первый кадр; кадр, соответствующий началу движения взгляда
Скорость обработки визуальной информации	Статичный сложный опто тип	Первый и последний кадр задержки взгляда на опто типе

Поскольку способ с использованием видеорегистрации движений глаз применим к измерению скорости зрительно-моторной реакции (ЗМР), относящейся к числу важнейших показателей работы зрительной сенсорной системы, была оформлена заявка на изобретение: «Способ определения скорости сложной зрительно-моторной реакции испытуемого и устройство для его осуществления» [6].

Оценка ЗМР основана на исследовании функций зрения в динамике. Скорость ЗМР определяется временем с момента появления сигнала (тестового стимула) до окончательного действия (ответа на него). Время СЗМР определяется как среднее время реакции испытуемого на сложный раздражитель зрительного характера. Измеряется в миллисекундах. Задачей настоящего изобретения является устранение недостатков известных способов определения СЗМР: повышение эффективности и точности измерений, информативности диагностических признаков и уменьшение времени обследования.

### Прибор, содержащий цилиндр с таблицей опто типов

#### Конструкция и характеристики прибора

Реализован опытный образец прибора [7–10], исключая основные недостатки средств оценки ДОЗ по методу компьютерного тестирования (погрешность от мелькания и инерционности экрана), за счет использования непрерывно движущихся опто типов (рис. 5). Прибор мобилен, прост в использовании, не создает дискомфорта для испытуемого, не имеет медицинских противопоказаний и может применяться для тренировки ДОЗ.

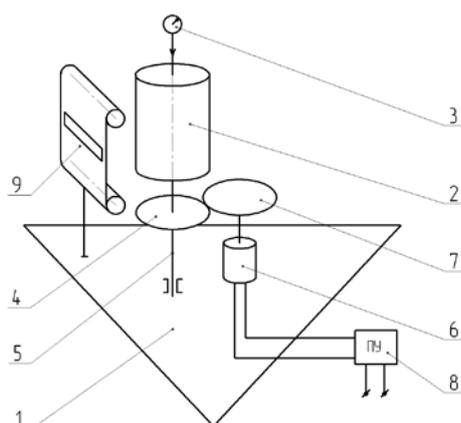


Рис. 5. Схема устройства для реализации способа определения ДОЗ: 1 – горизонтальное основание; 2 – цилиндр с таблицей опто типов на внешней поверхности; 3 – датчик угловой скорости; 4 – элемент передачи вращения; 5 – вертикальная ось; 6 – электродвигатель; 7 – закрепленный на валу элемент передачи вращения; 8 – пульт управления (компьютер); 9 – маска (непрозрачная гибкая пластина шириной не менее диаметра цилиндра 2, закрепленная на двух роликах и содержащая горизонтальную щель, которая может перемещаться по вертикали за счет наматывания материала пластины на ролики)

Основные технические характеристики прибора приведены в Табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики прибора

Параметр (характеристика)	Ед. измерения	Значение
Масса	кг	1,5
Масса цилиндра	кг	0,48
Максимальные габариты Ш×Г×В	мм	140×200×355
Длина окружности цилиндра	мм	402
Радиус цилиндра	мм	64
Высота цилиндра	мм	250
Угловая скорость	об/с	0,1–2,5
Шаг угловой скорости	об/с	0,001
Число строк таблицы опто типов		11
Величина опто типов	мм	0,2–2,6
Коэффициент пропорциональности между соседними строками опто типов		1,258
Ширина щели экрана	мм	20
Тип двигателя		шаговый
Точность шагового двигателя	% от шага	3–5
Сила тока на входе прибора	мА	400
Напряжение на входе прибора	В	12
Макетная плата с микроконтроллером		АТmega8
Режим управления шаговым двигателем		микрошаговый

Таблица опто типов – это несколько линий, каждая из которых состоит из черных квадратов со стороной  $a$ , находящихся на расстоянии  $a$  друг от друга. Величина  $a$  рассчитана аналогично расчету толщин колец Ландольта для классических таблиц определения СОЗ [11, 12].

Управление электродвигателем осуществляется с компьютера посредством специально разработанной автором программы для микроконтроллера АТmega8. Интерфейс программы управления прибором представлен на рис. 6.

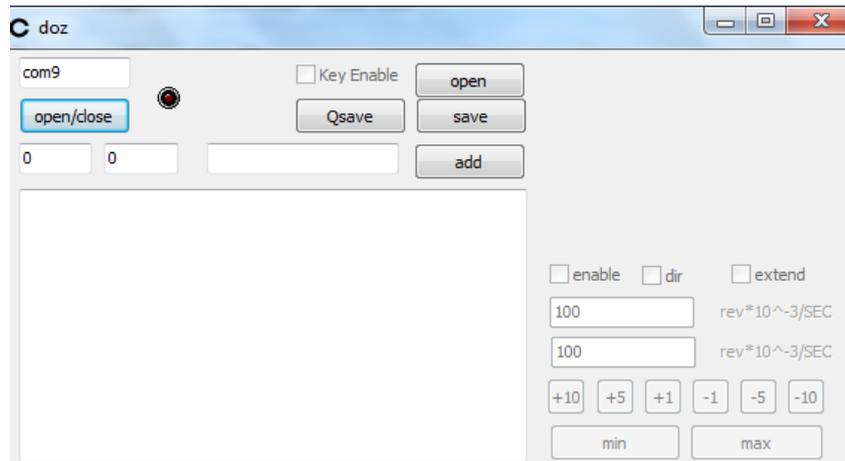


Рис. 6. Интерфейс прибора

Оконный интерфейс позволяет осуществлять: включение/выключение прибора; сохранение и импорт данных; сброс отсчетов (очистку данных); запись текущего отсчета. Окно содержит: поле ввода текущего отсчета; поле отображения текущей скорости; блок управления скоростью; поле отображения сохраненных отсчетов.

Подключение устройства к ПК осуществляется посредством переходника USB to COM.

#### Алгоритм выполнения измерений

При дневном освещении (естественном или искусственном) испытуемый усаживается на определенном расстоянии перед цилиндром с таблицей опто типов таким образом, чтобы маска с горизонтальной щелью находилась между ним и цилиндром, закрывая все линии таблицы опто типов, кроме одной.

Далее определяем СОЗ испытуемого. Для этого последовательно перемещаем щель маски по линиям опто типов, определяя линию с минимальными размерами, которую может различить испытуемый. Его просят сосредоточить взгляд на середине цилиндра и не пытаться отслеживать его вращение (не пытаться зрительно удерживать опто типы на протяжении траектории их движения). Затем цилиндр с таблицей опто типов приводится во вращение с постепенно увеличивающейся скоростью до момента, когда они для испытуемого визуально сливаются в сплошную линию. Соответствующую этому моменту угловую скорость регистрируют.

Далее испытуемому разрешают отслеживать вращение цилиндра (пытаться зрительно удерживать опто типы на протяжении траектории их движения) и снова приводят цилиндр во вращение с постепенно увеличивающейся скоростью до момента, когда опто типы для испытуемого визуально сливаются в сплошную линию. Далее регистрируют соответствующую этому моменту скорость вращения.

Этот же алгоритм повторяют для других расстояний между испытуемым и цилиндром. Для всех этапов измерений время перемещения опто типа выбранной линии на следующую позицию, соответствующее времени перемещения на величину, равную двойной стороне опто типа-квадрата, рассчитывали по выражению:

$$t = \frac{2 \cdot a}{r \cdot \omega}, \quad (4)$$

где  $t$  – искомое время – значение ДОЗ,  $r$  – радиус цилиндра,  $\omega$  – текущая скорость вращения цилиндра.

#### Условия эксперимента

Острота зрения испытуемых проверялась бинокулярно в хорошо освещенном помещении (при естественном или искусственном освещении). В эксперименте участвовали люди, не подвергавшиеся дополнительной предварительной физической нагрузке, так как степень утомленности влияет на величину ДОЗ.

Испытания проводились днем с 12 до 16 ч. Это важно, так как время суток также может повлиять на результат эксперимента. Кроме того, для одного испытуемого был проведен «суточный» мониторинг величины ДОЗ (с 7 до 23 ч).

Для каждого испытуемого формировалась своеобразная «карта измерений», в которую заносилась следующая информация: дата и время измерения, пол, возраст, состояние СОЗ, предшествующая физическая нагрузка, результаты измерений и комментарии (профессия, увлечения спортом, общее самочувствие на момент исследования и прочая информация, которая может являться существенной для задачи исследования). В результатах измерения отмечалось расстояние до цилиндра, минимальный различимый размер опто типа в статике; для режима движения цилиндра – наличие или отсутствие слежения за перемещением опто типов и, соответствующие этим условиям, скорости.

Измерения для каждого из испытуемых проводились с трех расстояний до цилиндра: 1, 0,75 и 0,5 м. Такой подход был применен с целью исследования возможного влияния аккомодации глаза на величину ДОЗ.

### Статистическая обработка результатов измерений

Все расчеты, построение графиков и анализ расчетных данных выполнялись в программе Matlab. Проведен программный подбор оптимального закона распределения. Программа рассчитывает основные параметры наиболее популярных из них и проверяет соответствие распределений по критерию Смирнова-Колмогорова.

По результатам работы программы для аппроксимации экспериментальных данных подобрано распределение Вейбулла (параметр масштаба  $A = 22,028$ ; параметр формы  $B = 1,527$ ). Критический уровень значимости для него составляет 0,912.

Ниже приведены выборки величины ДОЗ с учетом некоторых влияющих факторов, представленные в виде гистограммы с наложением огибающих, построенных по основным законам распределения (рис. 7).

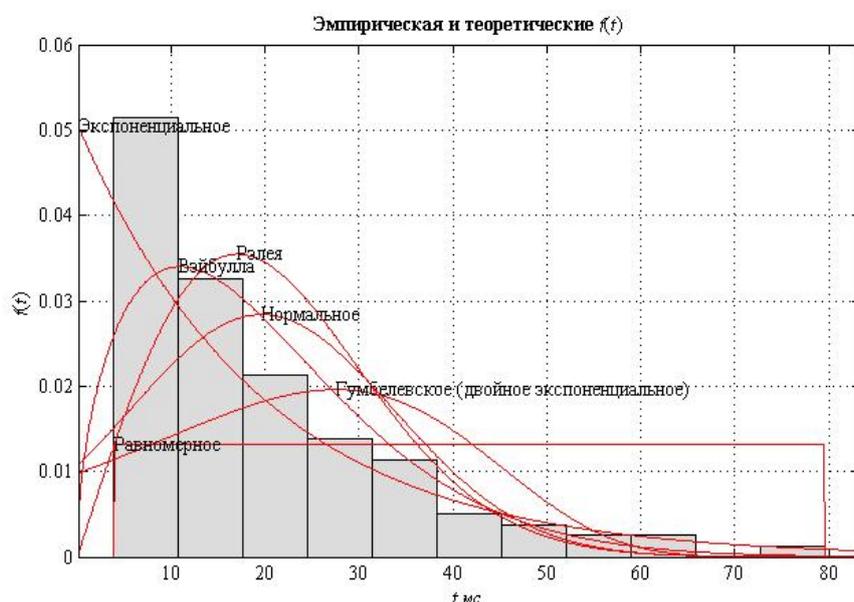


Рис. 7. Распределение ДОЗ (среднее значение 24,85 мс)

Отдельно приведено наложение функции распределения экспериментальных данных на эмпирическую функцию (рис. 8). Рассчитанные средние значения ДОЗ для выборок с учетом различных влияющих факторов приведены в Табл. 3.

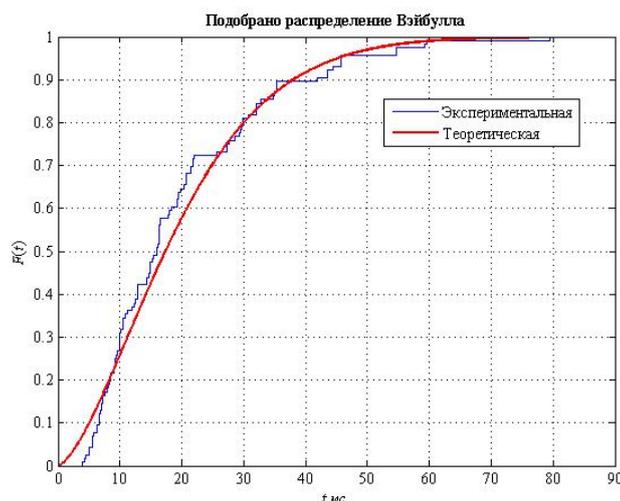


Рис. 8. Соответствие распределения ДОЗ закону Вэйбулла

Таблица 3

Средние значения ДОЗ

Условие	Размах выборки		Среднее значение ДОЗ			
	min	max	Выборочное	Рэлей	Вейбулл	Гамма ф-я
Для мужчин	3,92	79,57	18,8406	16,4452	21,0981	21,2593
Для женщин	4,32	59,68	21,0482	18,117	23,5663	23,7503
Расстояние 100 см	3,92	79,57	19,6779	17,0985	24,85	22,2042
Расстояние 75 см	5,59	54,71	18,4797	15,6407	20,8541	20,8521
Расстояние 50 см	3,92	59,68	15,6271	14,1136	17,3809	17,6332
Без слежения	7,65	79,57	23,7566	20,1681	26,8064	26,8300
Со слежением	3,92	44,42	15,5993	13,3404	17,6019	17,5077

Исследования показали, что среднее значение ДОЗ у мужчин составляет 21,09. Оно выше, чем у женщин (23,57). Значение величины ДОЗ зависит от расстояния до наблюдаемого объекта, о чем говорят следующие данные: расстоянию в 1 м соответствует ДОЗ = 24,85; 75 см – ДОЗ = 20,85; 50 см – ДОЗ = 17,38.

Проверка статистическими критериями показала соответствие распределений ДОЗ закону распределения Вэйбулла с коэффициентом масштаба  $A = 22,03$  и коэффициентом формы  $B = 1,53$  или в меньшей степени его частному случаю – закону Рэля с коэффициентом масштаба 17,1.

Огибающая гистограммы экспериментальных данных близка к распределению Вэйбулла и его частных случаев: Рэля для малых выборок и экспоненциальному с увеличением объема выборки. Кроме того, распределение величины ДОЗ со слежением за оптоотипом на протяжении траектории его движения соответствует экспоненциальному закону, в то время как без слежения, подчиняется закону распределения Рэля [13, 14].

### Регрессионный анализ данных

Величину ДОЗ выражают показателями времени презентации объекта, при которых испытуемый способен различать его детали. Эти величины могут лежать только в положительной области значений. Для их моделирования используются законы, такие как Вэйбулла или его частные случаи: экспоненциальное распределение (при постоянном коэффициенте вариации  $V = 1$ ) и распределение Рэля (при  $V = 0,523$ ). У однопараметрических распределений только один параметр – масштаб  $a$ , а их показатель формы  $b = \text{const}$  (для распределения Рэля  $b = 2$ , для экспоненциального  $b = 1$ ).

Данные, полученные при исследовании ДОЗ различными способами, отличаются друг от друга, но гипотеза о распределении величины ДОЗ по закону Вэйбулла подкреплена

проверкой полученных массивов данных методом максимального правдоподобия. Это позволяет моделировать распределения ДОЗ по закону Вэйбулла.

Ввиду невозможности проведения широкомасштабных экспериментов по оценке ДОЗ, эффективным средством определения ее величины является стохастическое моделирование. Для расчетов и моделирования использовались средства в Matlab.

Были определены статистические параметры распределений величины ДОЗ для каждого из разработанных методов. Для проверки достоверности полученных данных проведен регрессионный анализ одномерных имитационных систем по методу наименьших квадратов (МНК) с параметрами, рассчитанными для выборок экспериментальных данных с использованием модели линейной регрессии [15–17]. Найдены оценки коэффициентов аппроксимационного полинома (коэффициенты регрессии):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon(\mu, \sigma). \quad (5)$$

Далее приведены примеры моделирования.

При использовании прибора, содержащего цилиндр с опто типами, для регрессионного анализа выбрана зависимость величины ДОЗ от СОЗ. Коэффициенты регрессии равны:  $\beta_0 = 11,97$  и  $\beta_1 = 1,5$ :

$$Y = 11,97 + 1,5 \cdot x_1 + \varepsilon(\mu = 22,03; \sigma = 14).$$

При использовании способа с видеорегистрацией движений глаз для регрессионного анализа выбрана зависимость величины ДОЗ от тренировки. Коэффициенты регрессии равны:  $\beta_0 = 281,8557$  и  $\beta_1 = -1,9942$  (отрицательный коэффициент регрессии  $\beta_1$  говорит о соответствующем наклоне аппроксимационной линии):

$$Y = 281,86 - 1,99 \cdot x_1 + \varepsilon(\mu = 272; \sigma = 7,5).$$

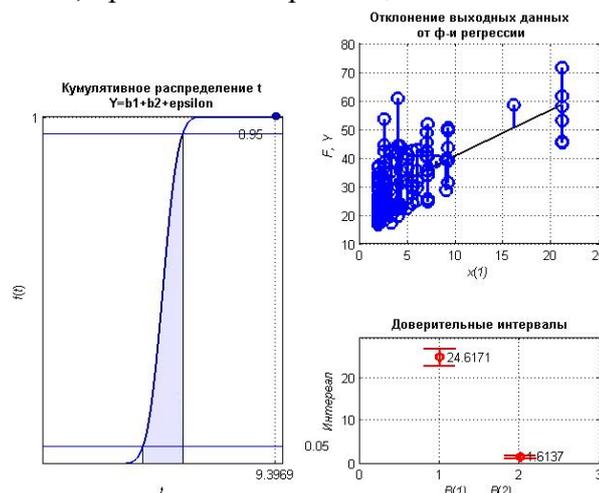
Для прогноза числа человек из общей выборки, имеющих определенную ДОЗ, коэффициенты регрессии равны:  $\beta_0 = 21,9579$  и  $\beta_1 = -1,0731$  (отрицательный коэффициент регрессии  $\beta_1$  говорит о соответствующем наклоне аппроксимационной линии):

$$Y = 21,97 - 1,07 \cdot x_1 + \varepsilon(\mu = 4; \sigma = 2).$$

На основании смоделированных данных найдены статистические оценки параметров с уровнем значимости  $\alpha = 0,1$ . Дан анализ статистической значимости коэффициентов после вычисления значений  $P(\beta \geq 0)$  и  $p(\beta \leq 0)$ , значения р-величины, нижней и верхней доверительных границ и доверительных интервалов коэффициентов.

Найденный коэффициент  $\beta_1$  определяет тангенс угла наклона регрессии и описывает заданную модель, имитирующую линейную зависимость.

Проверка непротиворечивости оценок коэффициентов регрессии выходным данным осуществлена на основе критерия Стьюдента. Результаты проверок для экспериментов с прибором, содержащим цилиндр с таблицей опто типов и с использованием видеорегистрации движений глаз, приведены на рис. 9а, 9б и 9с соответственно.



а

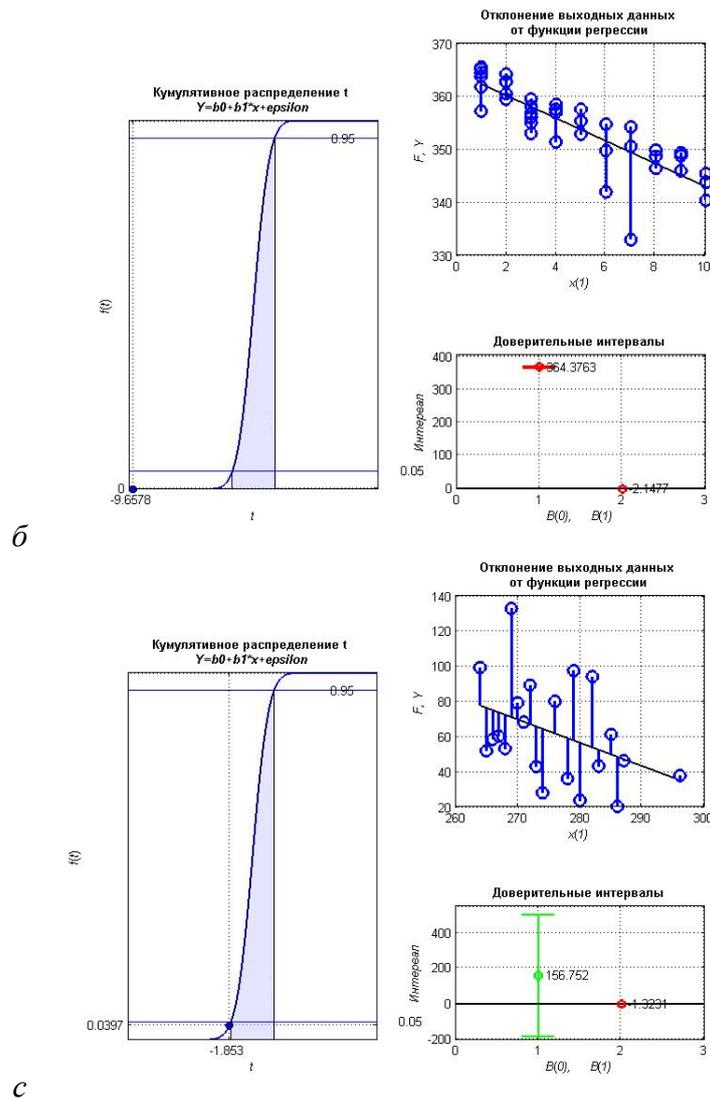


Рис. 9. Оценка коэффициентов регрессии: а – кумулятивное распределение Стьюдента; б – отклонения выходных данных от функции регрессии; с – доверительные интервалы

Значения случайной переменной  $t = \frac{b_2 - \beta_2}{s_{y2}}$  с вероятностью 0,9 находятся в интервале

$$-1,684 \leq \frac{b_2 - \beta_2}{s_{y2}} \leq 1,684.$$

Решение этих неравенств приводит к доверительному интервалу, который покрывает найденную оценку коэффициента  $b_2$ , которая принимается значимой с десятипроцентным уровнем значимости.

На языке гипотез проверка непротиворечивости оценок коэффициентов регрессии выходным данным означает проверку гипотезы  $H_0: \beta_2 = 0$ , против альтернативы  $H_1: \beta_2 \neq 0$ . То, что доверительный интервал коэффициента  $\beta_2$  с вероятностью 0,9 не включает ноль, является основанием отклонить гипотезу  $H_0: \beta_2 = 0$  и принять гипотезу  $H_1: \beta_2 \neq 0$  на уровне значимости 10 %.

Численные оценки подтверждаются графическим построением доверительных интервалов (правое нижнее окно) рис. 9а, 9б и 9с.

Левое окно показывает кумуляту Стьюдента с обозначениями на ней заданных уровней 0,05 и 0,95 квантилей, статистики  $t_{Stat}$  и вероятности  $P(t \leq t_{Stat}) \equiv P(\beta \geq t) > 0,95$ , которые также подтверждают предыдущие выводы о статистической значимости оценки  $\beta_2$ . [16, 17].

В правом верхнем окне (рис. 9а, 9б и 9с) показана функция регрессии, заданная в виде линейной функции одной переменной. Найденный коэффициент  $b_2$  определяет тангенс угла наклона регрессии и приблизительно правильно описывает заданную модель, имитирующую линейную зависимость с тангенсом угла наклона равным  $\beta$ . Линии, соединяющие функцию

регрессии с опытными данными, представляют отклонения выходных данных  $X$  от функции регрессии  $Y$  или, так называемые, остатки (residuals).

В соответствии с приведенными оценками можно утверждать, что измерения величины ДОЗ с использованием прибора, содержащего цилиндр с таблицей опто типов, и при видеорегистрации движений глаз, соответствуют точности на десятипроцентном уровне значимости оценок  $\beta$ .

### Основные достигнутые результаты проекта

1. Разработана новая методика оценки ДОЗ с применением высокоскоростной видеорегистрации движений глаз испытуемого во время выполнения задания по распознаванию опто типа и расчетом величины ДОЗ на основе определения времени движения зрачка по координатной сетке.

2. Получено среднее значение ДОЗ, равное 272 мс.

3. Методика позволяет оценить: скорость реакции (расчет промежутка времени от начала эксперимента до начала движения глаза); ДОЗ (сумма времени, затрачиваемого на перемещение взгляда из исходного положения на опто тип и задержки взгляда на нем, чтобы распознать); глазодвигательные способности, плавность движений глаз (расчет скоростей перемещения зрачка на протяжении траектории движения).

4. Поскольку способ с использованием видеорегистрации движений глаз применим к измерению скорости ЗМР, относящейся к числу важнейших показателей работы зрительной сенсорной системы, была оформлена заявка на изобретение [6].

5. Создан опытный образец прибора, реализующего запатентованный метод оценки ДОЗ, исключающий основные недостатки методов компьютерного тестирования. Он позволяет повысить точность измерения ДОЗ за счет использования непрерывно движущихся опто типов. Работа прибора, а также обработка измерений осуществляются при помощи специально разработанных программ.

6. ДОЗ у мужчин выше, чем у женщин. Значение величины ДОЗ зависит от расстояния до наблюдаемого объекта, о чем говорят средние значения этого параметра для расстояний: 1 м – ДОЗ = 24,85 мс.; 75 см – ДОЗ = 20,85 мс.; 50 см – ДОЗ = 17,38 мс.

7. Уровень ДОЗ у людей, занимающихся спортом, существенно лучше, чем у прочих (в особенности в условиях отсутствия слежения за движением опто типа). Предположительно это связано с регулярными тренировками. Впрочем, нельзя исключать и обратную зависимость: люди с хорошей ДОЗ показывают определенные достижения в спорте.

8. Гипотеза о распределении ДОЗ по закону Вейбулла подтверждена проверкой статистическими критериями. Это позволяет моделировать распределения ДОЗ по закону Вэйбулла и корректно проводить ее оценку.

9. Осуществлено стохастическое моделирование процесса оценки ДОЗ в среде MATLAB, позволяющее развивать ее теорию, основанную на статистике.

10. Разработан алгоритм, базирующийся на регрессионном анализе, и программное обеспечение для определения точности измерений величины ДОЗ, полученных различными методами.

11. В соответствии с приведенными оценками сделаны выводы о том, что оба разработанных способа применимы к измерению величины ДОЗ.

### Области возможного использования результатов проекта

Поскольку ДОЗ может быть ценным показателем профессиональной пригодности лиц, связанных с восприятием движущихся предметов, предложенные автором способы ее оценки, могут быть использованы в учебных учреждениях по профессиональной подготовке как военных, так и гражданских лиц (летчики, космонавты, водители, оперативные работники).

В спортивной индустрии – профессиональный отбор, тренировка зрения спортсменов.

С точки зрения интересов вооруженных сил Российской Федерации, методики могут быть использованы при профессиональном отборе летчиков, космонавтов, водителей, оперативных работников и т. п.

Поскольку состояние сенсорных функций зрения и движения глаз зависит от функционального состояния ряда структур мозга, то оценка сенсомоторных функций зрительной системы и определение ДОЗ используются для диагностики неврологических и психических заболеваний. Проект может быть интересен в сфере практической медицины для диагностики заболеваний и коррекции ДОЗ, а также для изучения механизмов зрительной системы. Возможно использование ДОЗ в личных интересах – для оценки собственных возможностей.

### Публикации

1. Привод CD / DVD в приборе для оценки динамической остроты зрения // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 12–15 апреля 2011 г.). Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2011. С. 300–301.
2. Мусалимов В.М., Ротц Ю.А. Экспериментальная оценка динамической остроты зрения (ДОЗ) // Труды VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб., 2011. С. 171–174.
3. Ротц Ю.А. Проблема экспериментальной оценки динамической остроты зрения (ДОЗ) // Сб. материалов XL Международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ». СПб., 2011. С. 16–18.
4. Ротц Ю.А. Методика и технология оценки динамической остроты зрения // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 6. С. 63–66.
5. Ротц Ю.А. Стохастические оценки динамической остроты зрения // Сб. тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых СПбНИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 10–13 апреля 2012 г.). Вып. 2. СПб., 2012. С. 305–306.
6. Ротц Ю.А., Резникова В.О., Ларичкин М.П. Оптическая система оценки динамической остроты зрения // Сб. конкурсных докладов X Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (7–11 ноября 2012 г.). Самара, 2012. С. 178–185.
7. Ротц Ю.А. Оценка распределений временных характеристик окуломоторной активности // Сб. тезисов докладов II Всероссийского конгресса молодых ученых СПбНИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 9–12 апреля 2013 г.). Вып. 2. СПб., 2013. С. 399–400.
8. Ротц Ю.А., Мусалимов В.М. Экспериментальное определение уровня динамической остроты зрения // Научно-технический вестник СПбНИУ ИТМО. Вып. 87. СПб., 2013. С. 49–53.
9. Способ определения скорости сложной зрительно-моторной реакции испытуемого и устройство для его осуществления: Заявка на изобретение: Входящий № 037481 / Ротц Ю.А., Мусалимов В.М., Польте Г.А., заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюдж. обр. учр. выс. проф. обр. «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». № 013125426. Заявл. 31.05.2013. – 14 с.

### Литература

1. Офтальмология: Медицинский портал Glazamed.ru, информационно-справочный ресурс: <http://www.glazamed.ru/lib/public03/simpt045.shtml>.
2. Кубарко А.И., Лукашевич И.В. Анализ механизмов динамической остроты зрения // Медицинский журнал. 2007. № 1. – 8 с.: <http://www.bsmu.by/files/category53/91>.
3. Польте Г.А. Повышение точности систем бесконтактных оптических измерений: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. – 22 с.
4. Воронцов Е.А., Мусалимов В.М., Саенко А.П. Способ определения динамической остроты зрения и устройство для его осуществления. Пат. 2462174, Рос. Федерация: МКП7 А61В3 / 032.
5. Саенко А.П. Методы и средства оценки динамической остроты зрения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Вып. 48. Мехатроника, технологии, системы автоматизированного проектирования. СПб., 2008. С. 87–89.
6. ISO 8596. Оптика и оптические приборы. Проверка остроты зрения. Стандартный оптотип и его предъявление.

7. ISO 8597. Оптика и оптические приборы. Проверка остроты зрения.
8. Мецераков В.В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB. М., 2009. – 448 с.
9. Привод CD / DVD в приборе для оценки динамической остроты зрения // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 12–15 апреля 2011 г.). Вып. 2. Труды молодых ученых. СПб., 2011. С. 300–301.
10. Мусалимов В.М., Ротц Ю.А. Экспериментальная оценка динамической остроты зрения (ДОЗ) // Труды VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб., 2011. С. 171–174.
11. Ротц Ю.А. Проблема экспериментальной оценки динамической остроты зрения (ДОЗ) // Сб. материалов XL Международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ». СПб., 2011. С. 16–18.
12. Ротц Ю.А. Методика и технология оценки динамической остроты зрения // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 6. С. 63–66.
13. Ротц Ю.А. Стохастические оценки динамической остроты зрения // Сб. тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых СПбНИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 10–13 апреля 2012 г.). Вып. 2. СПб., 2012. С. 305–306.
14. Ротц Ю.А., Резникова В.О., Ларичкин М.П. Оптическая система оценки динамической остроты зрения // Сб. конкурсных докладов X Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (7–11 ноября 2012 г.). Самара, 2012. С. 178–185.
15. Ротц Ю.А. Оценка распределений временных характеристик окуломоторной активности // Сб. тезисов докладов II Всероссийского конгресса молодых ученых СПбНИУ ИТМО (Санкт-Петербург, 9–12 апреля 2013 г.). Вып. 2. СПб., 2013. С. 399–400.
16. Ротц Ю.А., Мусалимов В.М. Экспериментальное определение уровня динамической остроты зрения // Научно-технический вестник СПбНИУ ИТМО. Вып. 87. СПб., 2013. С. 49–53.
17. Способ определения скорости сложной зрительно-моторной реакции испытуемого и устройство для его осуществления: Заявка на изобретение: Входящий № 037481 / Ротц Ю.А., Мусалимов В.М., Польте Г.А., заявитель и патентообладатель Фед. гос. бюдж. обр. учр. выс. проф. обр. «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». № 013125426. Заявл. 31.05.2013. – 14 с.



**Румянцев Александр Сергеевич**  
Факультет компьютерных технологий и управления  
Кафедра вычислительной техники  
E-mail: darkstreamray@gmail.com



**Рубина Ирина Семеновна**  
Факультет компьютерных технологий и управления  
Кафедра вычислительной техники  
E-mail: rubren@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ЦЕПОЧКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ КРУПНОЗЕРНИСТОГО РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО АППАРАТНОГО УСКОРИТЕЛЯ**

А.С. Румянцев, И.С. Рубина

Научный руководитель – доцент А.О. Ключев

### **Введение**

#### **Цель и задачи проекта**

Целью проекта является разработка прототипа инструментальной цепочки для отображения задач на крупнозернистые реконфигурируемые аппаратные ускорители (КРАУ) для высокопроизводительной цифровой обработки сигналов и мультимедийных данных. Для того чтобы КРАУ [1] заняли свою нишу между цифровыми сигнальными процессорами и программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС), они должны быть просты в использовании. Целевое приложение должно быть легко компилируемым и загружаемым во встроенную систему, в которой используется КРАУ. Отображение задачи на КРАУ подразумевает выделение в ней вычислительно емких последовательностей операций, которые могут быть отображены на КРАУ; назначение временных интервалов исполнения операций задачи; отображение данных операций на конкретную архитектуру вычислительных элементов КРАУ; маршрутизацию входных и выходных потоков данных и управление вычислительными элементами КРАУ [1]. В процессе отображения задачи на КРАУ необходимо учитывать следующие проектные ограничения: организацию вычислительных элементов, способ доступа к памяти, способ организации межсоединения, порты ввода-вывода, синхронизацию и механизм реконфигурации [2]. Стоит отметить, что в своей общей трактовке задача отображения приложения на КРАУ входит в класс комбинаторных задач с неполиномиальной оценкой числа итераций (является NP сложной) так же, как и проблема планирования задач на многопроцессорных системах [3].

В рамках данного исследования решались следующие задачи:

1. Обзор существующих методов отображения задач на КРАУ.
2. Разработка оптимального метода отображения задач на КРАУ, обеспечивающего наибольшую эффективность результирующей системы.
3. Разработка эвристического метода отображения задач на КРАУ, позволяющего обеспечить баланс между эффективностью результирующей системы и производительностью метода.
4. Высокоуровневое моделирование разработанных методов отображения задач на КРАУ с целью верификации функциональной целостности, получения предварительных оценок производительности (скорости вычислений по сравнению с другими подходами, эффективности результирующей системы и т. д.) и нахождения узких мест в предлагаемых методах.

5. Создание прототипа инструментальных средств для проектирования систем на базе КРАУ (определение общего подхода автоматизирующего проектирования системы/подсистемы на основе типовой архитектуры КРАУ и в максимальной степени упрощающего этап ее описания).

### **Методы исследования**

Предлагаемое исследование включает в себя теоретические и экспериментальные методы. К теоретическим относятся методы теории информации, статистического анализа и теории вероятностей. Экспериментальное исследование включает программное моделирование разрабатываемых методов и проектируемой системы с последующим профилированием и сравнительным анализом.

В работе над проектом были использованы следующие методы исследования:

1. Сравнительный анализ существующих методов отображения задач на крупнозернистые реконфигурируемые вычислительные системы.
2. Профилирование алгоритмов и приложений из проблемно-ориентированных областей с целью выделения их вычислительно емких ядер.
3. Моделирование проектируемых методов отображения задач.
4. Статистический анализ характеристик разработанных методов отображения задач на КРАУ по сравнению с другими подходами.
5. Применение системного подхода при разработке прототипа инструментальной цепочки для КРАУ.

### **Основные достигнутые результаты**

#### **Обзор существующих решений**

Подход, предложенный в работе [4], применяет отображение графов вычислений на основе модульного планирования для максимального использования параллелизма в циклах. Модульное планирование позволяет конвейеризировать выполнение циклов [5], путем создания расписания для одной итерации заданного цикла таким образом, чтобы это же расписание можно было выполнять через определенные промежутки времени с учетом всех внутренних и внешних зависимостей и ограничений по ресурсам. В работе [6] представлен подход отображения задачи на основе модульного планирования с приоритизацией по выходным потокам данных. Он призван ускорить процесс отображения задачи по сравнению с подходом на основе модульного планирования. Таким образом, вместо того, чтобы до маршрутизации по потокам данных произвести отображение операций на вычислительные элементы КРАУ, данный подход откладывает задачу отображения операций на вычислительные элементы до тех пор, пока не будет собрана необходимая информация о маршрутизации входных и выходных потоков данных.

В работе [7] для отображения задач на КРАУ FloRA используется высокоуровневый синтез. Данный подход пытается использовать параллелизм в циклах путем его разворачивания и конвейеризации. Для решения задачи отображения сначала применяется алгоритм планирования на основе списка для поиска начального решения. В дальнейшем для улучшения решения применяется эволюционный алгоритм QEA [8].

В разработанном алгоритме отображения используется метод, базирующийся на разнообразных подходах к эффективному покрытию графа с помощью заданных или генерируемых шаблонов [9, 10]. В работе [11] данная методика используется на стадии покрытия графа потока данных задачи шаблонами поддерживаемых операций. В дальнейшем происходит оптимальное разделение графа задачи на отдельные кластеры для непосредственного отображения на КРАУ путем решения задач целочисленного линейного программирования. С целью избавления от необходимости решения многочисленных ресурсоемких задач линейного программирования [12] был представлен эвристический метод решения задачи кластеризации, SPKM. Он базируется на формировании графа произвольной сложности с использованием операций разделения дуг графа и образования новых вершин [13].

Во всех рассмотренных подходах к отображению задач на КРАУ отсутствует потенциальная возможность применения метода к другому типу КРАУ одновременно с независимостью метода от структурной конфигурации КРАУ. Кроме того, особенность организации быстрых эвристических методов отображения задач на КРАУ делает невозможным использование динамических параметров функционирования системы для дальнейшей оптимизации отображения.

### Разработанный оптимальный метод отображения программ на КРАУ

Основная задача оптимального метода состоит в отображении произвольного вычислительно емкого ядра программы на КРАУ путем решения задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП) с использованием заранее заданной оценочной функции и ограничений. Как уже было отмечено ранее, задача отображения приложения на КРАУ является NP полной задачей [3] даже в самой простой постановке, когда приложение представлено разновидностью бинарного дерева, а соседние узлы КРАУ являются полносвязанными. Поэтому из-за отсутствия точного алгоритма решения данной задачи за полиномиальное время, будет осуществлен поиск наиболее оптимального решения с использованием ЦЛП.

Пусть  $(V, E)$  – ациклический граф задачи,  $(P, L)$  – ациклический граф потока данных и команд КРАУ, а текущее количество транзитных вершин равно RPE. Тогда определим булевы оценочные переменные в задаче ЦЛП следующим образом:

- $v_{ikl} = 1$ , если  $v_i \in V$  отображается на вершину КРАУ  $p_{kl} \in P$ ;
- $r_{ijkl} = 1$ , если  $r_j \in RPE$  является транзитной вершиной, кандидатом для дуги  $e_i \in E$  и отображается на  $p_{kl} \in P$ ;
- $q_{ijkl} = 1$ , если  $r_j \in RPE$  для  $e_i$  отображается на  $p_{kl} \in P$ ,

где  $v_i \in V, r_j \in RPE, p_{kl} \in P, M$  – количество строк в параметризованном шаблоне КРАУ,  $N$  – количество столбцов, а  $v, r$  и  $q$  – соответствующие булевы оценочные переменные.

Основная многокритериальная оценочная функция для ЦЛП стремится минимизировать количество используемых строк ( $uR$ ), столбцов ( $uC$ ) и транзитных вершин ( $uT$ ) в КРАУ, поэтому в формулу введены весовые функции  $w_{uR}(k), w_{uC}(l)$  и  $w_{uT}(k, l)$ :

$$\text{Min} \left( \sum_i^V \sum_k^M \sum_l^N w_{uR}(k) * v_{ikl} + \sum_i^V \sum_k^M \sum_l^N w_{uC}(l) * v_{ikl} + \sum_i^E \sum_j^{RPE} \sum_k^M \sum_l^N (w_{uR}(k) + w_{uC}(l) + w_{uT}(k, l)) * q_{ijkl} \right)$$

где  $M$  – количество строк в матрице КРАУ, а  $N$  – количество столбцов.

Ограничения, налагаемые на основную оценочную функцию, можно записать с помощью следующей системы линейных уравнений:

$$\forall i, \sum_k^M \sum_l^N v_{ikl} \leq 1 \tag{1}$$

$$\forall i, j, \sum_k^M \sum_l^N r_{ijkl} \leq 1 \tag{2}$$

$$\sum_i^V \forall k, l, v_{ikl} + \sum_i^E \sum_j^{RPE} \forall k, l, q_{ijkl} \leq 1 \tag{3}$$

$$\begin{cases} w_{uR}(k) = 0, \forall k \leq uR_{bound} \\ w_{uR}(k) = uR_{pen} (uR_{bound} - k), \forall k > uR_{bound} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} w_{uC}(l) = 0, \forall l \leq uC_{bound} \\ w_{uC}(l) = uC_{pen} (uC_{bound} - l), \forall l > uC_{bound} \end{cases} \tag{5}$$

$$w_{uT}(k, l) = \frac{\max(w_{uR}(k), w_{uC}(l))}{(|V - P| * \sum_i^E \sum_j^{RPE} r_{ij}(k, l))} \tag{6}$$

где  $uR_{bound}$  – ограничение по количеству используемых строк,  $uR_{pen}$  – штрафной коэффициент при превышении  $uR_{bound}$ ,  $uC_{bound}$  – ограничение по количеству используемых столбцов,  $uC_{pen}$  – штрафной коэффициент при превышении  $uC_{bound}$ . Ограничения 1, 2 и 3 задают возможность отображения только одной операции или транзитной функции на вершину целевого КРАУ.

На рис. 1 схематично показан процесс решения данной задачи ЦЛП:

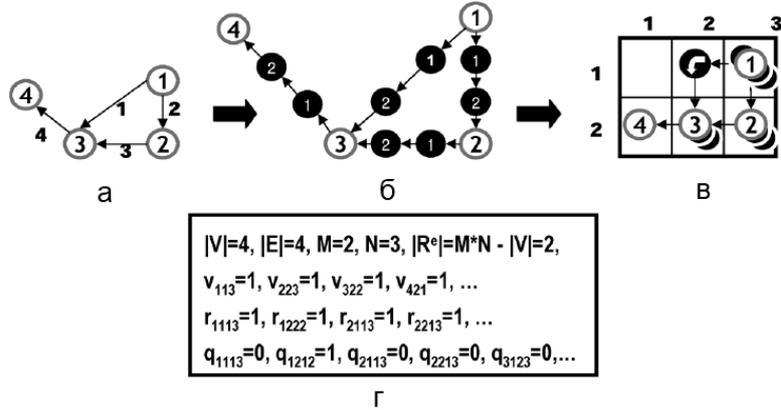


Рис. 1. Процесс решения и значение булевых переменных задачи ЦЛП: а – исходный граф отображаемой задачи; б – произведена вставка транзитных вершин; в – планируемый результат решения задачи ЦЛП; г – процесс изменения значений булевых переменных задачи ЦЛП

**Эвристический метод отображения программы на КРАУ**

Основная цель эвристического метода заключается в том, чтобы отобразить программу цифровой обработки сигналов или мультимедийных данных, написанных на языке высокого уровня, например С или С++, на встроенную систему с процессором общего назначения и спроектированным КРАУ. Это позволит значительно ускорить выполнение данной программы и уменьшить энергопотребление системы [14]. Разработанный эвристический метод отображения (Extended SPKM) во многом основан на подходах из области составления оптимального расписания для многопроцессорных систем [15, 16] и эвристическом методе решения задачи кластеризации SPKM [12]. Предлагаемый метод состоит из четырех этапов:

1. Преобразование исходного кода в граф потока данных и команд с выделением вычислительно емких ядер и выполнение оптимизаций над ним. На данной стадии используется платформа для исследования методов компиляции для высокопроизводительных машин SUIF [17]. После чего получается в общем случае не ациклический граф потока данных и управления. Далее используются подходы к оптимизации на основе «гиперблоков», представленных в работе [18], а также выделение подходящих «гиперблоков» вычислительно емких ядер, используя набор заранее заданных критериев для последующего отображения их на КРАУ. Участки исходного кода, которые оказалось нецелесообразно исполнять на КРАУ или не удалось отобразить в результате последующих этапов метода, будут исполняться на процессоре общего назначения.

2. Кластеризация полученного графа на сильно связанный граф неограниченного количества вычислительных элементов КРАУ с использованием алгоритмов покрытия графов [9]. Задача данного этапа состоит в том, чтобы отобразить полученные на предыдущем этапе графы на граф, состоящий из неограниченного количества вычислительных элементов КРАУ, при этом все его соседние вычислительные элементы связаны друг с другом. Во время выполнения этой операции осуществляется попытка уменьшить количество используемых вычислительных элементов КРАУ, их различных конфигураций и критический путь

исходного графа. В результате получаем граф отображения задач на вычислительные элементы КРАУ.

3. Планирование со сжатием полученного на втором этапе графа позволяет учесть количество вычислительных элементов КРАУ и связи между ними. Кроме того, на данном этапе могут быть использованы динамические параметры функционирования системы для получения оптимального сжатия графа конкретной задачи. Предлагаемый метод планирования состоит из двух стадий:

- использование метода разделения графа с выталкиванием вершин [13] и нахождение минимального его сечения на основе применения метода оптимального планирования задач на многопроцессорных системах CASS-II [19];

- применение разработанных эвристических подходов к оптимизации и упаковке графа для конкретной конфигурации КРАУ.

Предлагаемые эвристические подходы к оптимизации и упаковке графа:

- осуществляется попытка изменения конфигурации транзитных вершин с использованием маршрутизации на основе дерева «Штейнера» [20];

- выполняется избавление от транзитных вершин, которые могут быть убраны в определенных случаях;

- задействуются возможности микросеквенсора конфигураций для последовательного выполнения в одной вершине нескольких операций, что позволяет уменьшить критический путь в отображенном графе задачи и уменьшить количество транзитных вершин;

- производится процедура «сжатия» графа по строкам и столбцам за счет коммутации входного и выходного банков памяти и использования микросеквенсора конфигураций.

4. Финальное отображение на ресурсы КРАУ исходных алгоритмов с генерацией конфигураций для каждого вычислительного элемента КРАУ. Задачи этого этапа:

- уместить в имеющиеся ресурсы КРАУ и в ресурсы ее отдельных вычислительных элементов подготовленные графы задач. Для достижения заданных целей используется разработанный алгоритм отображения распланированного графа на ресурсы КРАУ, псевдокод которого приведен ниже:

/\* На вход подается «кластеризованный» и оптимизированный граф  $G$

На выходе формируется конфигурация каждого ОЭ КРАУ для каждого такта \*/

0 Функция AllocateCGRAResources( $G$ ) {

1 По всем уровням  $G$ , начиная с входных потоков данных {

2 Выделение свободных ОЭ для текущего такта;

3 Цикл по всем используемым ОЭ {

4 Попытка записи выходных значений в общую память, передача

5 соседнему ОЭ или запись во внутреннюю память

6 } если цикл вышел по ошибке, то идем на метку label\_recover

7 Цикл по всем используемым ОЭ {

8 Попытка назначить входным портам соответствующие входные данные

9 в такт, который на  $N$  тактов раньше текущего такта, где

10  $N$  является (1,2,3,4,...,начальный такт)

11 } если цикл вышел по ошибке, то идем на метку label\_recover

12 Идти на метку label\_next\_lvl

13 Метка label\_recover: Вставить один или несколько пустых тактов ожидания

14 перед текущим тактом

15 Метка label\_next\_lvl: Переход на следующий уровень графа

16 }

17 }

- формирование конфигурационных карт для каждого цикла исполнения отдельных вычислительных элементов КРАУ. Множество таких карт представляет собой конфигурационную программу исполнения исходной задачи на КРАУ.

### Экспериментальные результаты

Для проведения экспериментальных измерений были выбраны различные методы эвристического отображения задач на КРАУ:

- DRESC, маршрут проектирования которого основан на использовании метода модульного планирования [4] совместно с принципом модельной закалки;
- АНН, в котором интенсивно используется решение отдельных задач отображения на основе целочисленного линейного программирования [11];
- SPKM базируется на основе подхода к построению графа произвольной сложности с использованием операций его разделения с выталкиванием новых вершин [12]. Большинство задач отображения решается с помощью целочисленного линейного программирования;
- QEA, считающийся одним из лучших эволюционных методов для оптимизации различных решений [14];
- ILP – обеспечивает полное решение задачи отображения с помощью целочисленного линейного программирования;
- ESPKM – разработанный метод отображения задач на КРАУ.

Все эксперименты проводились на упрощенной модели встроенной системы, реализованной на языке проектирования системного уровня SystemC, с вариантом КРАУ Matrix [21], который поддерживает конфигурируемое распределение вычислительных ресурсов. КРАУ Matrix состоит из массива одинаковых 8-битных базовых вычислительных блоков, объединенных каналами передачи данных и конфигурационной сетью. Каждый базовый вычислительный блок содержит блок памяти на 256 байт, 8-битовое арифметико-логическое устройство и блок снижения логики управления.

На рис. 2 показан средний процент успешных отображений для выборки из случайных задач в зависимости от количества вычислительных элементов в КРАУ для различных методов отображения. Из графика видно, что разработанный метод заметно опережает в эффективности методы АНН, DRESC и SPKM, находясь наравне с QEA и незначительно отставая от ILP.

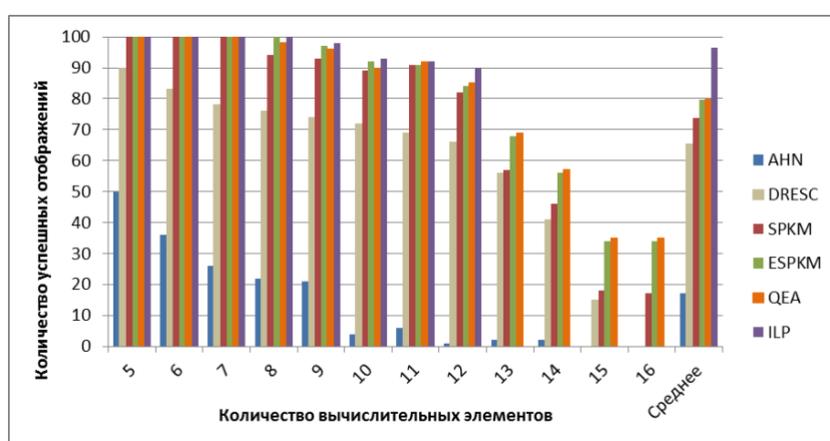


Рис. 2. Зависимость количества успешных отображений от числа вычислительных элементов

Для более подробного сравнения с методом ILP на рис. 3 приведена зависимость процента оптимального отображения задач из случайной выборки от количества вычислительных элементов в КРАУ. В целом метод ESPKM обеспечивает оптимальное отображение задач на КРАУ более чем в 60 % случаев.

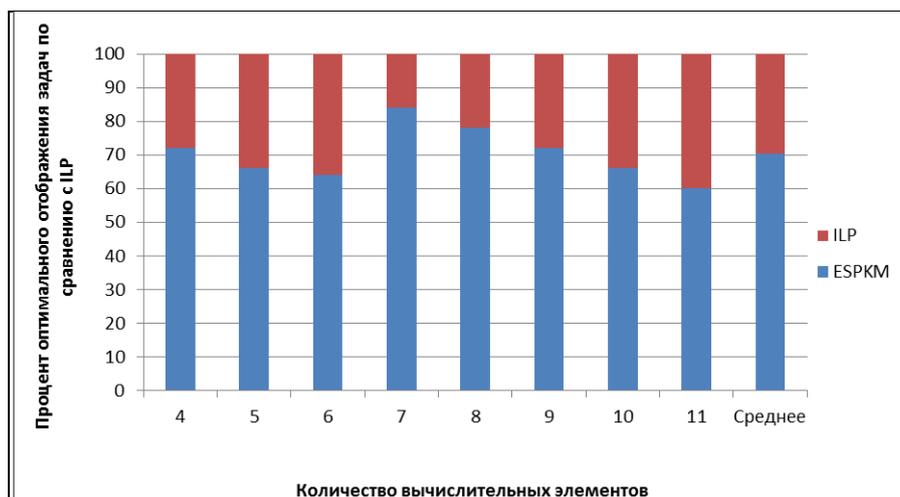


Рис. 3. Зависимость процента оптимальных отображений задач от числа вычислительных элементов

На рис. 4 показана зависимость среднего времени работы метода от количества вычислительных элементов в КРАУ. Разработанный метод ESPKM в среднем оказывается в полтора раза быстрее остальных эвристических методов, а ILP показывает самое длительное время работы.

По среднему времени выполнения отображенной задачи на КРАУ (рис. 5) видно, что разработанный метод ESPKM показывает себя не хуже, а в шести из десяти проведенных тестов даже лучше остальных методов. В качестве сравнения на рис. 5 также приведено время выполнения задач на процессоре общего назначения.

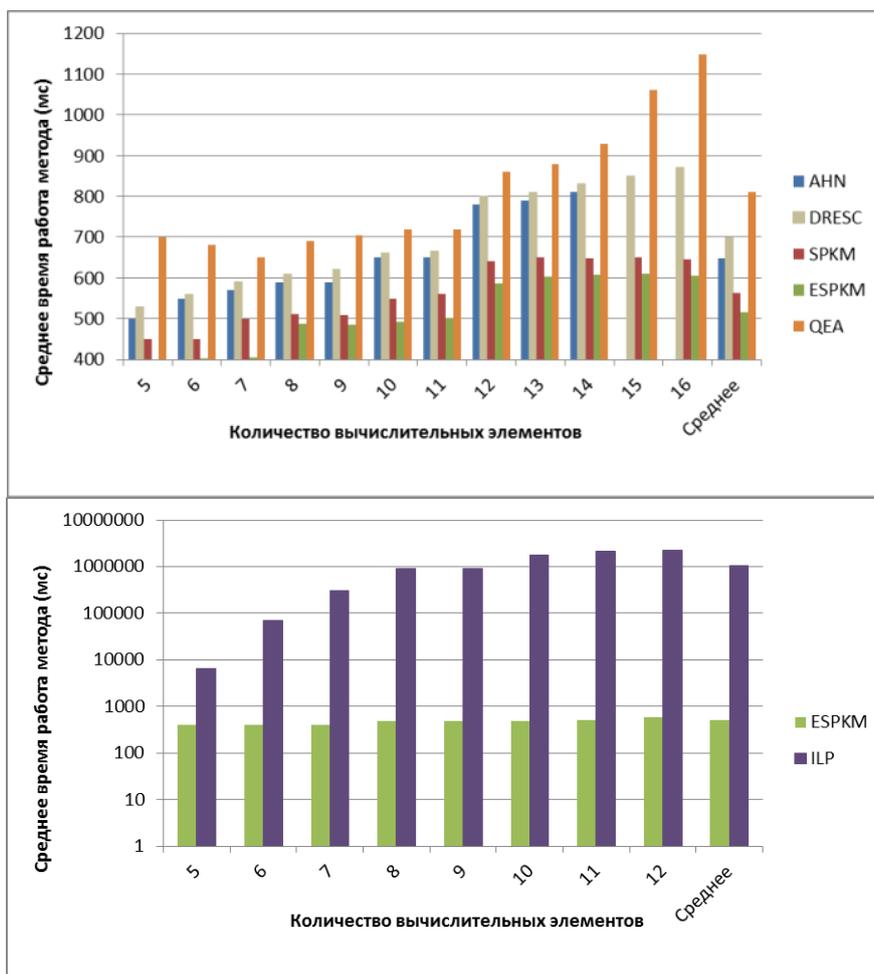


Рис. 4. Зависимость среднего времени работы метода от числа вычислительных элементов

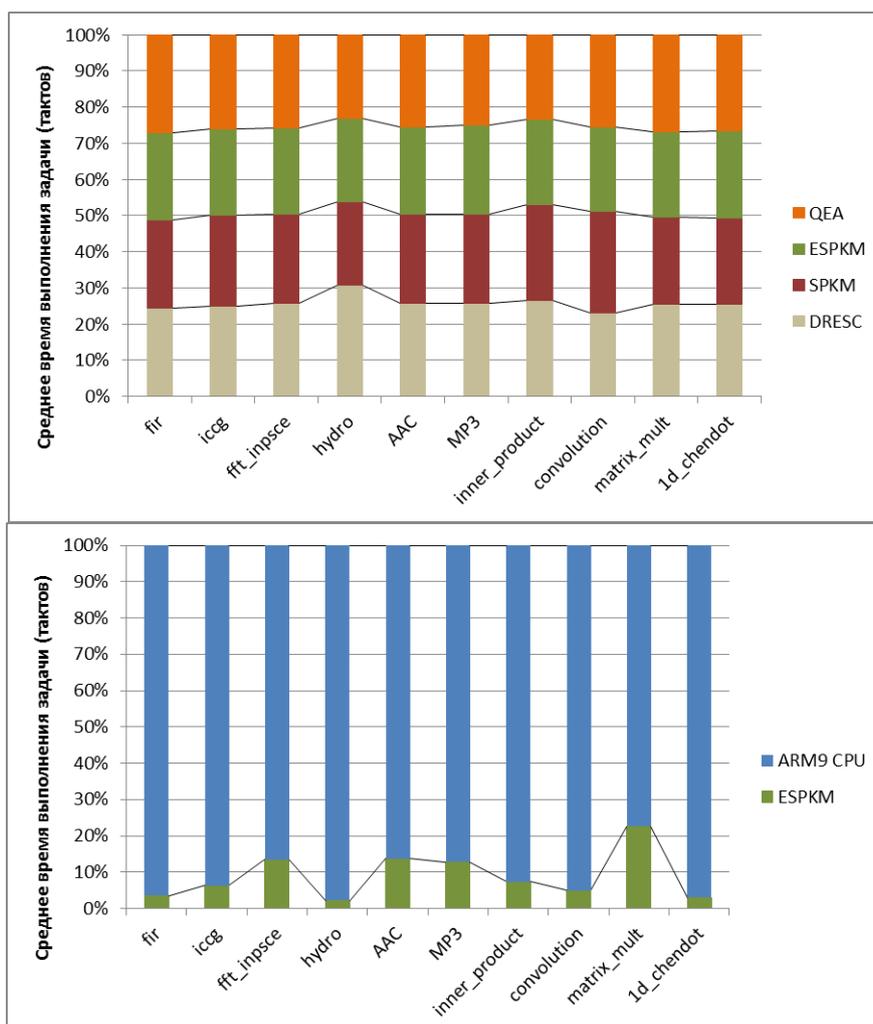


Рис. 5. Среднее время выполнения задач [22], отображенных на систему различными методами

### Разработанная инструментальная цепочка программирования КРАУ

Разработанная инструментальная цепочка проектирования показана на рис. 6. Программа, написанная на языке высокого уровня C, сначала обрабатывается с использованием набора компиляторов SUIF для выделения вычислительно емких ядер (в основном циклов) и формирования графа потока данных и управления. Кроме того, к промежуточному представлению исходного кода применяются базовые принципы оптимизации такие, как удаление неиспользуемого кода, оптимизация логических выражений, инвариантные для цикла преобразования кода и рекурсивное распространение константных значений.

Далее операции, которые могут быть реализованы на реконфигурируемой вычислительной системе, поступают на стадию синтеза конфигураций, а остальные компилируются стандартным компилятором C для используемого процессора общего назначения. Отображение операций на реконфигурируемую вычислительную систему происходит с использованием оптимального алгоритма на основе ЦЛП или путем применения разработанного эвристического алгоритма ESPKM.

Стоит отметить, что не во всех случаях на стадии синтеза конфигурации удастся получить отображение задачи на реконфигурируемую вычислительную систему. Вычислительные операции, которые были выбраны для отображения на реконфигурируемую вычислительную систему, реализуются на процессоре общего назначения. Данный подход позволяет добиться гарантированной работоспособности всей цепочки проектирования в ущерб эффективности конечного решения в отдельных случаях.

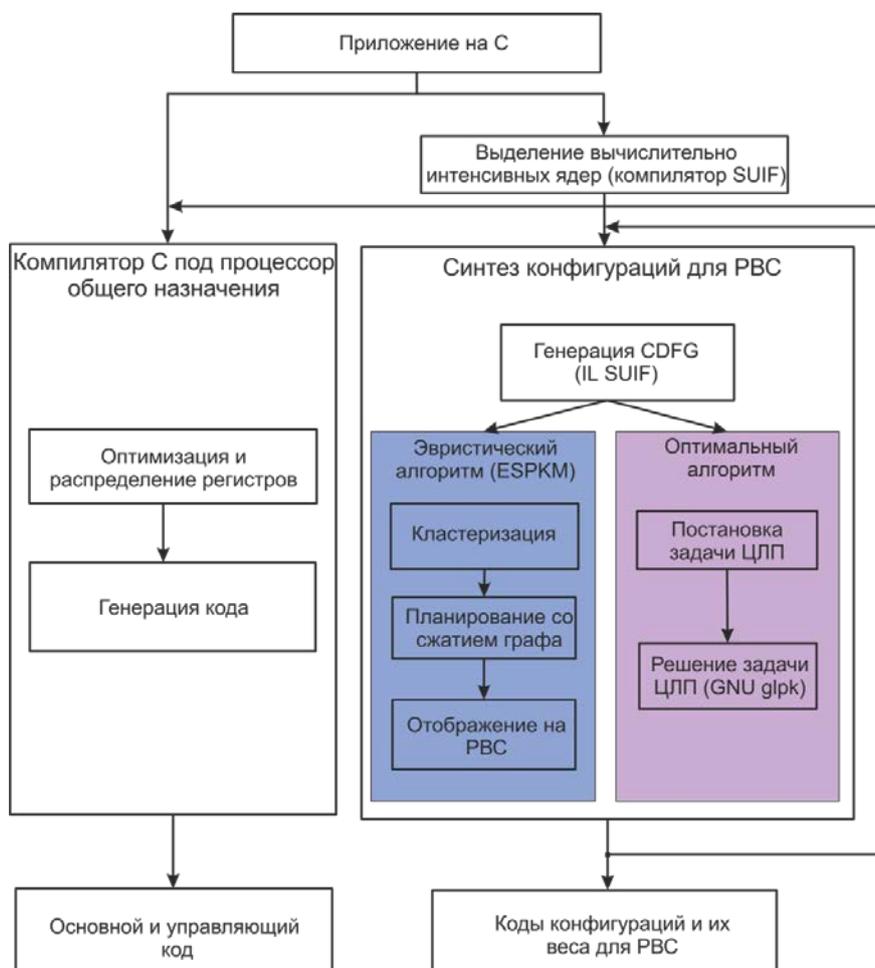


Рис. 6. Инструментальная цепочка проектирования

В результате формируется основной управляющий код для процессора общего назначения с интегрированными «точками вызова» отдельных подзадач, выполняемых на реконфигурируемой вычислительной системе, и кодами конфигураций для операций, выполняемых на реконфигурируемой вычислительной системе.

### Заключение

В ходе исследования был разработан прототип инструментальной цепочки КРАУ, предложен подход к оптимальному отображению задач на КРАУ и разработан метод эвристического отображения задач на КРАУ.

В рамках работы разработан новый эвристический метод отображения задач на крупнозернистые вычислительные системы (ЕСРКМ), который выполняется в среднем в полтора раза быстрее существующих эвристических методов отображения и обеспечивает оптимальное отображение задач более чем в 60 % случаев (по сравнению с разработанным оптимальным методом – ИЛР). Кроме того, по эффективности отображенной задачи, представленный метод оказывается не хуже существующих и позволяет использовать динамические параметры функционирования системы для дальнейшего улучшения получаемого отображения задачи.

Были решены следующие задачи:

- исследованы существующие методы отображения задач на КРАУ;
- создан оптимальный метод отображения задач на КРАУ;
- разработан эвристический метод отображения задач на КРАУ;
- создан прототип инструментальных средств для проектирования систем на базе разработанного реконфигурируемого аппаратного ускорителя;
- произведен анализ характеристик разработанной инструментальной цепочки программирования КРВС.

Результаты работы найдут дальнейшее применение на кафедре ВТ НИУ ИТМО в учебном процессе, а также в научно-исследовательской работе.

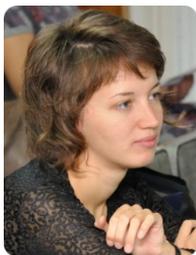
### Публикации

1. Румянцев А.С. Быстрый последовательный целочисленный делитель по основанию 4 // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 6 (76). С. 81–86.
2. Румянцев А.С. Современные встроенные реконфигурируемые системы и инструментальные средства для них // Сб. тезисов VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. Вып. 1. Информационные системы и технологии. СПб., 2011. С. 38–39.
3. Румянцев А.С. Организация и инструментальные средства реконфигурируемых вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 79–84.
4. Румянцев А.С. Крупнозернистый реконфигурируемый аппаратный ускоритель для высокопроизводительной цифровой обработки сигналов и мультимедийных данных // Мат-лы XLI научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 32.
5. Румянцев А.С. Архитектура базового вычислительного элемента крупнозернистого реконфигурируемого аппаратного ускорителя // Сб. тезисов докладов I Всероссийского конгресса молодых ученых. Вып. 1. Информационные системы и технологии. СПб., 2012. С. 8–9.
6. Румянцев А.С. Организация и инструментальные средства реконфигурируемых вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 79–84.
7. Румянцев А.С. Метод отображения задач на крупнозернистые реконфигурируемые вычислительные системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики (в печати).

### Литература

1. Румянцев А.С. Организация и инструментальные средства реконфигурируемых вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 79–84.
2. Hannig F., Dutta H., Teich J. Mapping of regular nested loop programs to coarse-grained reconfigurable arrays – constraints and methodology // *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04)* (26–30 April 2004). P. 148–155.
3. El-Rewini H., Lewis T., Ali H. Task scheduling in parallel and distributed systems. Prentice Hall, 1994. – 304 p.
4. Mei B., Vernalde S., Verkest D. et al. DRESC: A retargetable compiler for coarse-grained reconfigurable architectures // *International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)* (16–18 December, 2002). Hong Kong, 2002. P. 166–173.
5. Ramakrishna R.B. Iterative modulo scheduling. Technical report HPL-94-115, HP Laboratories, 1995.
6. Park H., Fan K., Mahlke S.A. et al. Edge-centric modulo scheduling for coarse-grained reconfigurable architectures // *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Parallel Architecture and Compilation Techniques (PACT'08)*. Toronto, 2008. P. 166–176.
7. Lee G., Lee S., Choi K., Dutt N. Routing-aware application mapping considering steiner point for coarse-grained reconfigurable architectures // *Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium (ARC'10)* (Bangkok, Thailand, March 17–19, 2010). P. 231–243.
8. Han K.-H., Kim J.-H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6. No 6. P. 580–593.
9. Guo Y., Smit G.J.M., Broersma H., Heysters P.M. A graph covering algorithm for a coarse grain reconfigurable system // *Proceedings of the ACM SIGPLAN Conference on Languages, Compilers, and Tools for Embedded Systems (LCTES'03)* (June 2003, San Diego, USA). P. 199–208.

10. Guo Y., Hoede C., Smit G.J.M. A pattern selection algorithm for multi-pattern scheduling // Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05); 12<sup>th</sup> Reconfigurable Architecture Workshop (RAW 2006) (25–29 April 2006, Rhodes Island, Greece). P. 198–205.
11. Ahn M., Yoon J.W., Paek Y. et al. A spatial mapping algorithm for heterogeneous coarse-grained reconfigurable architectures // Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe (DATE'06) (March 2006). P. 363–368.
12. Yoon J.W., Shrivastava A., Park S. et al. A graph drawing based spatial mapping algorithm for coarse-grained reconfigurable architectures // *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2009. Vol. 17. No 11. P. 1565–1578.
13. Battista G.D., Patrignani M., Vargiu F. A split & push approach to 3D orthogonal drawing // Graph Drawing: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium (GD'98) (Montréal, Canada, August 13–15, 1998). P. 87–101.
14. Овсянников Е.П., Петров С.Е., Юрков К.В. Сравнительный анализ сложности реализации быстрых цифровых преобразований на RISC-процессорах // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 9. С. 34–38.
15. Sarkar V. Partitioning and scheduling parallel programs for execution on multiprocessors. London, 1989. – 201 p.
16. Liou J.-C., Palis M.A., Wei D.S. Performance analysis of task clustering heuristics for scheduling static DAGs on multiprocessor // *Parallel Algorithms and Applications*. 1997. Vol. 12. P. 185–203.
17. Callahan T.J., Hauser J.R., Wawryzynek J. The Garp architecture and C compiler // *IEEE Computer*. 2000. Vol. 33. No 4. P. 62–69.
18. Liou J.-C., Palis M.A. A new heuristic for scheduling parallel programs on multiprocessor // Proceedings of the 1998 International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques (PACT'98). P. 358–365.
19. Patrignani M., Pizzonia M. The complexity of the matching-cut problem // Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science (WG'01). 2001. P. 284–295.
20. Cohoon J.P., Richards D.S., Salowe J.S. A linear-time Steiner tree routing algorithm for terminals on the boundary of a rectangle // *Computer-Aided Design (ICCAD-88)*. Digest of Technical Papers (7–10 November 1988). P. 402–405.
21. Mirsky E., DeHon A. MATRIX: A reconfigurable computing architecture with configurable instruction distribution and deployable resources // 4<sup>th</sup> IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines (FCCM'96) (Napa Valley, California, April 1996). P. 157–166.
22. DSP Compiler and Processor Evaluation – DSPstone:
23. <http://www.ice.rwth-aachen.de/research/tools-projects/entry/detail/dspstone>.



**Сергеева Елена Игоревна**  
Факультет естественнонаучный  
Кафедра высшей математики  
E-mail: srgv.lena@gmail.com

## **ОБОБЩЕННЫЕ СРЕДНИЕ В.А. СТЕКЛОВА В ЗАДАЧЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ ПО ИЗВЕСТНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ В УЗЛАХ**

Е.И. Сергеева

Научный руководитель – доцент Г.Ю. Пуеров

### **Введение**

В представленном научно-исследовательском проекте предлагается решение задачи, которая часто встречается в разных областях науки и техники. По набору известных данных в произвольных точках (узлах) заданной области (эти точки могут располагаться как регулярно, так и произвольно) требуется получить функцию (удовлетворяющую некоторым условиям гладкости), восстанавливающую данные в других точках этой области. Например, имеются приборы, находящиеся в фиксированных точках двумерной области (узлах), одновременно снимающие значения параметров быстропротекающего процесса. Требуется определить значения параметров в других точках области. При этом вычисления должны производиться в условиях реального времени.

Изучению различных вопросов задачи восстановления посвящена огромная литература, авторами которой являются как математики, так и специалисты в других областях науки и техники. В частности, методы решения данной задачи даны в работах Д. Шепарда [1], Р. Харди [2], Дж. Дюшона [3]. Р. Франк в работе [4] дал обзор ряда подходов к решению этой задачи.

### **Цели и задачи проекта**

- Разработка вычислительно-эффективных алгоритмов для решения поставленной задачи.
- Математическое обоснование и сравнение разработанных алгоритмов с известными.
- Реализация комплекса программ на базе разработанных алгоритмов.

### **Методы исследования**

В ходе выполнения данного научно-исследовательского проекта использовались методы и результаты классического математического анализа, теории функций вещественной переменной, теории интерполирования и приближения функций, а также методы компьютерного моделирования и численные методы. При проектировании и разработке комплекса программ применялись принципы структурного программирования.

### **Основные результаты**

В ходе выполнения научно-исследовательской работы для решения вышеперечисленных задач был использован хорошо разработанный аппарат классической теории аппроксимации [5–10].

В частности, для решения поставленной задачи применен аппарат средних В.А. Стеклова. Разработанные алгоритмы восстановления данных по известным значениям в узлах базируются на подходе, предложенном в работе [7]. Важнейшим его обстоятельством является то, что все операции удается осуществить в конечной форме, не прибегая к приближенным методам. Этот же подход развивается в работах [11–16].

Одной из составных частей при решении задачи восстановления данных является операция сглаживания. В ходе выполнения научно-исследовательского проекта предложены

алгоритмы сглаживания, построенные на базе обобщенных средних В.А. Стеклова, описанные в работах [17, 18]. Была проведена оценка возникающих при восстановлении функций погрешностей. Некоторые оценки отклонений обобщенных средних В.А. Стеклова получены в работе [19]. Выполнено компьютерное моделирование предложенных алгоритмов.

**Оценка отклонений обобщенных средних В. А. Стеклова функций двух переменных**

Установлены оценки  $m$ -й итерации отклонений средних В.А. Стеклова для  $2m$  раз непрерывно дифференцируемых функций.

В дальнейшем мы будем использовать следующие обозначения и соглашения. Пусть рассматривается некоторая величина  $x \in \mathbb{R}^2$ , тогда  $x_k$  ( $k=1, 2$ ) обозначает ее  $k$ -ю координату. Если  $x, y \in \mathbb{R}^2$ , то скалярное произведение элементов  $x, y$  обозначаем через  $(x, y)$ . Пусть  $a, b \in \mathbb{R}^2$ , тогда запись  $a, b$  ( $a < b$ ) означает, что  $a_k, b_k$  ( $a_k < b_k$ ) при  $k=1, 2$ ,  $ab = (a_1b_1, a_2b_2)$ . Если  $[a, b]$  то – множество точек  $x \in \mathbb{R}^2$ , удовлетворяющих неравенствам  $a, x, b$ .

Пусть  $G \subset \mathbb{R}^2$ , через  $C(G)$  обозначаем множество непрерывных функций  $f : G \rightarrow \mathbb{R}$ ,

$$P_f P_{G, \infty} = \sup_{x \in G} |f(x)|;$$

если  $f$  измерима на  $G$ ,  $1 \leq p < \infty$ , то полагаем

$$P_f P_{G, p} = \left( \int_G |f|^p \right)^{1/p}.$$

В дальнейшем  $C^{(r)}(G)$  – множество функций, имеющих все частные производные порядка не выше  $r$  непрерывные на  $G$ , где  $r \in \mathbb{Z}_+, G$  открыто ( $G \subset \mathbb{R}^2$ ). Пусть  $f \in C^{(r)}(G), x \in G$ , обозначим

$$D_r f(x) = \sqrt{\sum_{k=0}^r C_r^k \left( \frac{\partial^r f(x)}{\partial x_1^k \partial x_2^{r-k}} \right)^2}.$$

Если  $a, b \in \mathbb{R}^2, a < b \in \mathbb{R}_+^2$  такое, что  $[a-z, b+z] \subset G, f \in C^{(2m)}(G)$  ( $m \in \mathbb{N}$ ),  $1 \leq p \leq \infty$ ,

то

$$\Lambda_{z,m}^*(f, [a, b])_p = \sup_{u \in [-z, z]} PD_{2m} f P_{[a+u, b+u], p}.$$

Если  $f \in C(\mathbb{R}), h > 0, r-1 \in \mathbb{N}, x \in \mathbb{R}$ , то

$$S_{h,1}(f, x) = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} f(x+t) dt,$$

$$S_{h,r}(f, x) = S_{h,1}(S_{h,r-1}(f), x).$$

Функция  $S_{h,r}(f)$  называется средним В.А. Стеклова функции  $f$  порядка  $r$  с шагом  $h$ .

Для функций двух переменных среднее В.А. Стеклова определяется следующим образом:

$$S_{h,r}(f) = S_{h_1, r_1} S_{h_2, r_2}(f).$$

При этом равенство понимается так: сначала оператор  $S_{h_1, r_1}$  применяется к  $f$  как функции одного первого аргумента, а затем оператор  $S_{h_2, r_2}$  применяется к  $S_{h_1, r_1}(f)$  как функции одного второго аргумента.

Через  $E$  обозначаем тождественный оператор.

В монографии Н.И. Ахиезера [6] на основе интеграла Джексона-Валле-Пуссена ( $I_n$ ) построен оператор  $I_{n,r} = E - (E - I_n)^r$  ( $n, r \in \mathbb{N}$ ). Данный подход получил развитие в работах

И.Ю. Харрик [20] и И.П. Натансона [21], а в дальнейшем изучался в работах многих математиков.

В работе В.В. Жука [7] установлена оценка отклонений средних В.А. Стеклова функции  $f$  порядка  $r$  с шагом  $h$  (приводим ее в случае функций двух переменных): если множество  $G$  открыто и выпукло ( $G \subset \mathbb{R}^2$ ),  $f \in C^{(2)}(G)$ ,  $a, b \in \mathbb{R}^2$ ,  $h > \mathbf{0}^2$ ,  $r \in \mathbb{N}^2$ ,  $[a - \frac{hr}{2}, b + \frac{hr}{2}] \subset G$ ,

$1, p, \infty$ , то

$$P f - S_{h,r}(f) P_{[a,b],p} \leq \frac{(r, h^2)}{24} \Lambda_{\frac{rh}{2}, 1}^*(f, [a, b])_p.$$

Положим

$$S_{h,r,m}(f) = (E - (E - S_{h,r})^m)(f), \quad m \in \mathbb{N}.$$

**Теорема.** Пусть  $G \subset \mathbb{R}^2$ ,  $G$  – открыто и выпукло,  $m \in \mathbb{N}$ ,  $f \in C^{(2m)}(G)$ ,  $a, b \in \mathbb{R}^2$ ,  $h > \mathbf{0}^2$ ,  $r \in \mathbb{N}^2$ ,  $[a - \frac{mhr}{2}, b + \frac{mhr}{2}] \subset G$ ,  $1, p, \infty$ , тогда

$$P S_{h,r,m}(f) - f P_{[a,b],p} \leq \left( \frac{(r, h^2)}{24} \right)^m \Lambda_{\frac{mhr}{2}, m}^*(f, [a, b])_p.$$

**Следствие.** Пусть  $G \subset \mathbb{R}^2$ ,  $G$  открыто и выпукло,  $m \in \mathbb{N}$ ,  $f \in C^{(2m)}(G)$ ,  $a, b \in \mathbb{R}^2$ ,  $h > \mathbf{0}^2$ ,  $r \in \mathbb{N}^2$ ,  $[a - \frac{mhr}{2}, b + \frac{mhr}{2}] \subset G$ ,  $1, p, \infty$ , тогда

$$P S_{h,r,m}(f) - f P_{[a,b],p} \leq \left( \frac{(r, h^2)}{24} \right)^m P D_{2m} f P_{[a - \frac{hrm}{2}, b + \frac{hrm}{2}], p}.$$

### Алгоритмы сглаживания на базе обобщенных средних В. А. Стеклова

Пусть задан прямоугольник  $\Pi$ . Стороны прямоугольника разбиваются на равные части с шагами  $h_1$  и  $h_2$  по каждой стороне соответственно. Обозначим  $\mathbf{h} = (h_1, h_2)$ . Узлы равномерной сетки задаются следующим образом:  $\{u^{(l)} = (l_1 h_1, l_2 h_2)\}$ , где  $l_i$  – целые числа,  $\mathbf{l} = (l_1, l_2)$ . В точках  $u^{(l)}$  известны значения функции  $f$ . Требуется найти гладкую на  $\Pi$  функцию  $g$  «хорошо» аппроксимирующую  $f$ .

Составной частью решения данной задачи является операция сглаживания. В работе [7] сглаживание осуществляется с помощью средних В.А. Стеклова  $S_{\mathbf{h},r}$  порядка  $\mathbf{r} = (r_1, r_2)$  с шагом  $\mathbf{h} = (h_1, h_2)$ . Важнейшим обстоятельством данного подхода является то, что все операции удается осуществить в конечной форме, не прибегая к приближенным методам.

Развивая данный в [7] подход, для выполнения операции сглаживания в работе [17] предложено использовать следующее обобщение средних В.А. Стеклова

$$S_{\mathbf{h},r,m}(f) = (E - (E - S_{\mathbf{h},r})^m)(f),$$

где  $E$  – тождественный оператор,  $m \in \mathbb{N}$ .

Предложен следующий алгоритм построения аппроксимирующей функции.

1. Строится аппроксимирующий оператор следующим образом:

$$G_{\mathbf{h}}(\varphi, x) = h_1 h_2 \sum \varphi(u^{(l)}) \psi_{\mathbf{h},(2,2)}(x - u^{(l)}).$$

2. К построенному на первом шаге оператору применяется сглаживание:

$$S_{\mathbf{h},r,m}(G_{\mathbf{h}}(\varphi)) = (E - (E - S_{\mathbf{h},r})^m)(G_{\mathbf{h}}(\varphi)),$$

где  $E$  – тождественный оператор,  $m \in \mathbb{N}$ .

Так как  $S_{h,p}(\psi_{h,r}, t) = \psi_{h,r+p}(t)$ , то сглаженная функция является комбинацией ядер В. А. Стеклова. Например, при  $m = 2$ ,  $r = (2, 2)$  получаем:

$$S_{h,(2,2),2}(G_h(\varphi)) = h_1 h_2 \sum_I \varphi(u^{(I)}) (2\psi_{h,(4,4)}(x - u^{(I)}) - \psi_{h,(6,6)}(x - u^{(I)})).$$

Для оценки погрешностей, возникающих при работе данного алгоритма, предлагается использовать результаты, приведенные выше.

### Области возможного использования результатов проекта

Задача восстановления данных по известным значениям в узлах некоторой сетки имеет большое практическое значение, как и множество ее приложений. Например, моделирование и построение различных геометрических объектов, численное решение уравнений математической физики и многие другие в разных областях математики, геологии, биологии, обработки сигналов и т. п.

Рассмотрим подробнее некоторые из них.

- Восстановление поврежденных изображений [22–24].
- Способы решения задачи восстановления функций могут быть использованы для восстановлении поврежденных изображений, например, если часть данных изображения утеряна, то недостающие могут быть восстановлены за счет имеющихся.
- Построение поверхностей [25, 26] и автоматизированное геометрическое проектирование [27–32, 14].
- Основная идея здесь состоит в том, чтобы обеспечить такое представление кривых и поверхностей, с которыми можно легко работать на компьютере, то есть легко хранить и отображать на экране ЭВМ.
- Промышленное проектирование.

Обычно проектировщик имеет описание кабины автомобиля, корпуса судна, фюзеляжа самолета, сложных деталей двигателей и т. д. в виде дискретного набора точек. Чтобы получить требуемый объект, нужно описать эти точки как лежащие на некоторой кривой или поверхности [33].

### Заключение

В ходе выполнения научно-исследовательского проекта были решены следующие задачи:

- получена оценка отклонений обобщенных средних В.А. Стеклова
- $$S_{h,r,m}(f) = (E - (E - S_{h,r})^m)(f),$$
- для  $2m$  раз непрерывно дифференцируемых функций двух переменных;
- разработан алгоритм построения аппроксимирующей функции со сглаживанием на базе обобщенных средних В.А. Стеклова;
  - выполнено компьютерное моделирование предложенных алгоритмов.

### Публикации

1. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по значениям в узлах равномерной сетки // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2012. С. 318–319.
2. Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И. Оценка отклонений обобщенных средних В.А. Стеклова гладких функций двух переменных // Мат-лы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, 2012. С. 67–69.
3. Сергеева Е.И. Алгоритмы сглаживания на базе обобщенных средних В.А. Стеклова при восстановлении функций по известным значениям в узлах // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 285–286.
4. Puerov G.Yu., Sergeeva E.I. Estimate for deviations of generalized Steklov averages for functions of two variables // Journal of Mathematical Sciences. 2013. Vol. 189. No 3. P. 536–543.

### Литература

1. *Shepard D.* A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // ACM'68: Proceedings of the 1968 23<sup>rd</sup> ACM national conference. New York, 1968. P. 517–524.
2. *Hardy R.L.* Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces // Journal of geophysical research. 1971. Vol. 76. No 8. P. 1905–1915.
3. *Duchon J.* Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces // ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis – Modélisation Mathématique et Analyse Numérique. 1976. Vol. 10. No 3. P. 5–12.
4. *Franke R.* Scattered data interpolation: Tests of some methods // *Mathematics of Computation*. 1982. Vol. 38. No 157. P. 181–200.
5. *Алберг Дж., Нильсон Э., Уоли Дж.* Теория сплайнов и ее приложения. М., 1972. – 318 с.
6. *Ахиезер Н.И.* Лекции по теории аппроксимации. М., 1965. – 407 с.
7. *Жук В.В.* Методические указания к курсу «Теория аппроксимации функций и ее приложения». Ч. 2. СПб., 1993. – 41 с.
8. *Жук В.В.* Лекции по теории аппроксимации. СПб., 2008. – 394 с.
9. *Даугавет И.К.* Введение в классическую теорию приближения функций: Учебн. пособие. СПб., 2011. – 232 с.
10. *Lorentz G.* Approximation of functions. New York, 1966.
11. *Dodonov N.Yu., Zhuk V.V.* On uniform approximation in  $R^2$  of continuous functions of two variables with bounded variation in the sense of Hardy // Journal of Mathematical Sciences. 2004. Vol. 122. No 3. P. 3184–3211.
12. *Dodonov N.Yu., Zhuk V.V.* Uniform approximation of nonperiodic functions defined on the entire axis // Journal of Mathematical Sciences. 2004. Vol. 124. No 3. P. 4968–4979.
13. *Dodonov N.Yu.* Approximation of functions in the spaces  $L_p(R)$  by means of shifts and contractions of one function // Journal of Mathematical Sciences. 2005. Vol. 128. No 5. P. 3214–3231.
14. *Dodonov N.Yu.* On uniform approximation of abstract functions by aggregates of summatory type on a rectangle // Journal of Mathematical Sciences. 2007. Vol. 142. No 1. P. 1788–1805.
15. *Dodonov N.Yu.* On uniform approximation of abstract functions on convex polygons // Journal of Mathematical Sciences. 2007. Vol. 144. No 6. P. 4592–4611.
16. *Масальских А.В.* Использование агрегатов приближения сумматорного типа при передискретизации цифровых изображений // Мат-лы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула, 2013. С. 67–69.
17. *Пуеров Г.Ю., Сергеева Е.И.* Обобщенные средние В.А. Стеклова в задаче восстановления данных по значениям в узлах равномерной сетки // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2012. С. 318–319.
18. *Сергеева Е.И.* Алгоритмы сглаживания на базе обобщенных средних В.А. Стеклова при восстановлении функций по известным значениям в узлах // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 285–286.
19. *Puerov G.Yu., Sergeeva E.I.* Estimate for deviations of generalized Steklov averages for functions of two variables // Journal of Mathematical Sciences. 2013. Vol. 189. No 3. P. 536–543.
20. *Харик И.Ю.* К проблеме аппроксимации функций, связанной с исследованием сходимости вариационных процессов // Докл. АН СССР. 1951. Т. 81. № 2. С. 157–160.
21. *Натансон И.П.* О приближении к многократно дифференцируемым периодическим функциям при помощи сингулярных интегралов // Докл. АН СССР. 1952. Т. 82. № 3. С. 337–339.
22. *Uhlir K., Skala V.* Radial basis function use for the restoration of damaged images // M. Viergever, K. Wojciechowski, B. Smolka et al. (eds.). Computer Vision and Graphics. Vol. 32 of Computational Imaging and Vision. Dordrecht, 2006. P. 839–844.
23. *Perez P., Gangnet M., Blake A.* Poisson image editing // ACM Transactions on Graphics. 2003. Vol. 22. No 3. P. 313–318.
24. *Lewis J.P.* Lifting detail from darkness // SIGGRAPH'01: Proceedings of the SIGGRAPH 2001 conference Sketches and Applications. ACM Press, 2001.

25. Carr J.C., Beatson R.K., Cherrie J.B. et al. Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions // SIGGRAPH'01: Proceedings of the 28<sup>th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, 2001. P. 67–76.
26. Lewis J.P. Lifting detail from darkness // SIGGRAPH'01: Proceedings of the SIGGRAPH 2001 conference Sketches and Applications. ACM Press, 2001.
27. Pighin F., Hecker J., Lischinski D. Synthesizing realistic facial expressions from photographs // SIGGRAPH'98: Proceedings of the 25<sup>th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, 1998. P. 75–84.
28. Noh J.-Y., Neumann U. Expression cloning // In SIGGRAPH'01: Proceedings of the 28<sup>th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, 2001. P. 277–288.
29. Joshi P., Tien W.C., Desbrun M., Pighin F. Learning controls for blend shape based realistic facial animation // SCA'03: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH / Eurographics symposium on Computer animation. Aire-la-Ville, 2003. P. 187–192.
30. Lewis J.P., Corder M., Fong N. Pose space deformation: A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation // SIGGRAPH'00: Proceedings of the 27<sup>th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, 2000. P. 165–172.
31. Sloan P.-P.J., Rose C.F., Cohen M.F. Shape by example // In SI3D'01: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics. New York, 2001. P. 135–143.
32. Kurihara T., Miyata N. Modeling deformable human hands from medical images // Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (SCA-04). 2004. P. 357–366.
33. Квасов Б.И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами. М.; Ижевск, 2006. – 413 с.



**Смирнов Роман Игоревич**  
Факультет точной механики и технологии  
Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии  
E-mail: sri7@mail.ru

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МОРСКОЙ ЛЕДОСТОЙКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ОСВОЕНИЮ РОССИЙСКОГО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА**

Р.И. Смирнов

Научный руководитель – доцент Д.И. Казунин

### **Введение**

Резолюция ИМО (International Maritime Organization) А89 «Рекомендации по подготовке персонала морских передвижных установок (МПУ)», а также конвенция по «Подготовке и дипломированию моряков и несению вахты» (ПДМНВ-95) поставили перед морскими администрациями стран-участниц ряд новых задач. Одна из них – разработка средств обучения, предназначенных для подготовки, оценки компетентности и отработки навыков поведения в повседневных и аварийных ситуациях.

Единственным крупным неиспользованным резервом нефти и газа во всем мире на настоящий момент остаются шельфовые месторождения. Повышение квалификации персонала морских буровых предприятий крайне важно для обеспечения безаварийного освоения шельфа.

Для эффективного обучения и переподготовки кадров необходимы полномасштабные тренажеры с физическими устройствами управления, максимально приближенными к реальным системам. Одним из них является продукт ЗАО «Гранзас морские технологии» – тренажер морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная» (рис. 1), моделирующий работу всего технологического оборудования на борту, позволяющего выполнять бурение скважин, добычу нефти и газа, хранение нефти и прямую ее отгрузку на танкеры. Он является частью тренажерного комплекса «Добыча», который включает в себя тренажер LCHS (Liquid Cargo Handling Simulator) – танкер «Белокаменка», являющийся плавучим нефтехранилищем, и нефтяной арктический танкер с носовой загрузкой.

Основную роль в любом тренажерном комплексе играет математическая модель, которая выполняет вычисления и обменивается данными с интерфейсом. Работа посвящена созданию математической модели тренажера МЛСП.



Рис. 1. Морская ледостойкая стационарная платформа «Приразломная»

### Постановка задачи

Тренажер МЛСП предназначен для подготовки и обучения персонала технологических платформ, в сферу ответственности которых входит:

- добыча нефтяных запасов;
- подготовка нефти для транспортировки;
- хранение и периодическая отгрузка нефти на челночные танкеры.

Тренажер МЛСП обеспечивает:

– визуальное ознакомление обучаемых с технологическим процессом добычи нефти (рис. 2, 3, 4);

– извлечение нефти из продуктивного горизонта; управление погружными электроцентробежными насосами, имитация работы с оборудованием устья скважин;

– управление пластовым давлением путем закачки воды;

– обучение управлению системой доведения нефти до необходимых экспортных параметров;

– выполнение необходимых операций с сепарационной установкой;

– управление технологическим оборудованием;

– подготовку к выполнению операций с газом;

– отработку навыков по добыче пластовой воды и ее утилизации с помощью системы поддержания пластового давления (ППД): управление восполнением дефицита воды для ППД морской водой, прошедшей соответствующую обработку;

– обучение управлению системой хранения и транспортировки нефти через систему учета, а затем через шланговочные устройства на танкер арктического класса.

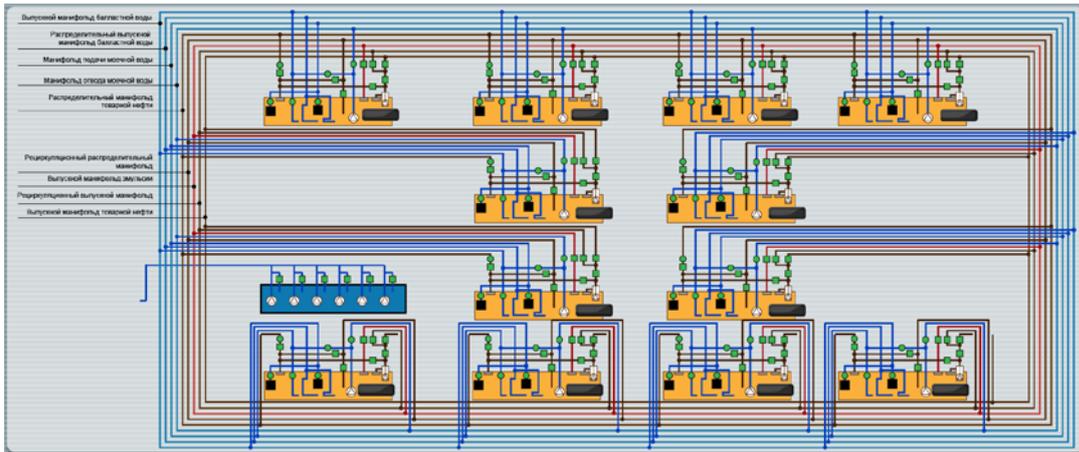


Рис. 2. Пример экрана общего вида танков хранения нефти

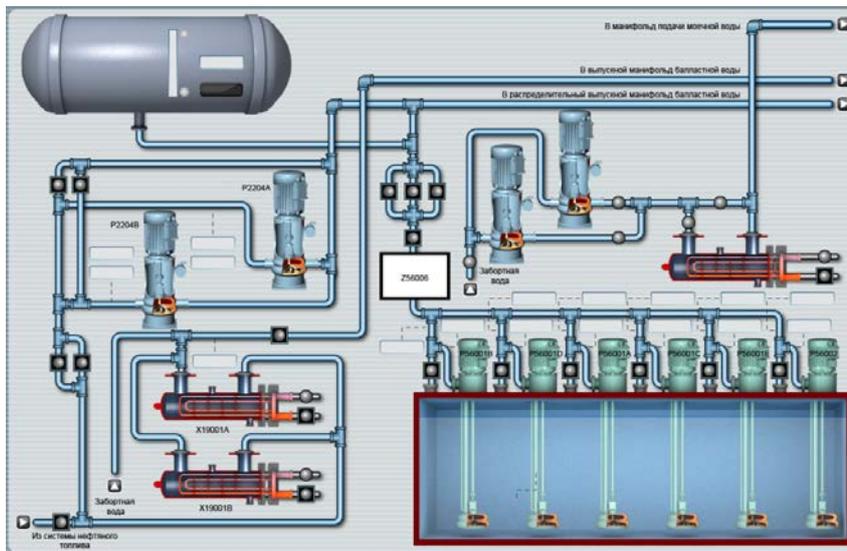


Рис. 3. Пример экрана системы забортной воды

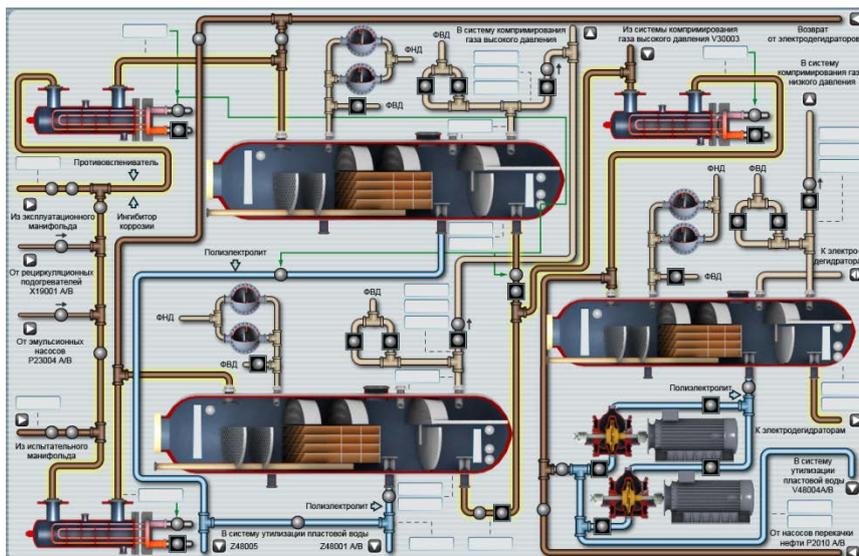


Рис. 4. Пример экрана системы сепарации нефти

Модель тренажера должна строиться на основе схемы системы платформы и адекватно реагировать на изменение эксплуатационных и внешних параметров во всем эксплуатационном диапазоне режимов работы.

Изучив конвенцию ПДМНВ-95, можно сформулировать требования, выдвигаемые к математической модели МЛСП:

- модель должна быть построена на основе законов сохранения энергии и массы (концентрации), для всех типов операций тренажера (упражнений), то есть каждое загруженное упражнение (начальное состояние) должно позволять выполнять произвольную последовательность операций со всеми системами тренажера;
- течение в трубах для дискрета 1, 5 и 25 с описывается стационарным одномерным потоком вязкой, несжимаемой, многокомпонентной жидкости. Модель должна работать в режиме реального и ускоренного времени;
- нестационарность (квазистационарность) вносится в систему с помощью меняющихся параметров граничных объемов и энергоизменяющихся характеристик объектов сети;
- граничные объемы (танки) моделируются сосредоточенными объемами, имеющими массу, с поверхностью раздела «жидкость-газ», которая определяет нивелирную высоту поступающих в объем сред. Жидкость испаряется или конденсируется в зависимости от парциального давления ее фазы в газовой среде. Температура среды в объеме определяется в четырех-девяти точках по высоте для закрытых и в одной точке для открытых объемов. В процессе вычислений нужно обеспечить смешивание и отстаивание разных сортов грузов, а также рассчитывать взрывоопасные концентрации для газообразной фазы и ее точку росы. Жидкость мало сжимаема. Газовые среды – сжимаемые, жидкости – вязкие. Параллельно необходимо рассчитать прочность объемов;
- должны быть предусмотрены: заполнение/опорожнение труб, а также возможность течения жидкости и газа по одной и той же трубе; возможность течения по кольцу без четко заданных граничных условий («неопределенное кольцо»); нагрев и охлаждение жидкости при течении по трубам и теплообменным аппаратам в зависимости от ее температурного напора и при взаимодействии с окружающей средой или теплоносителем;
- объекты сети имеют характеристики заранее определенного вида или подчиняющиеся вычисляемым из состояния потоков сети законам сохранения массы и энергии. Объекты гидравлической сети должны иметь поведение эквивалентное их техническим аналогам;
- объекты модели должны иметь пределы их возможного конструктивного использования, соответствующие судовым аналогам с учетом их прочности;
- моделируемые среды должны иметь поведение, характерное их физическому аналогу в установленном целях обучения диапазоне параметров;
- суммарная масса всех сред в рамках замкнутой системы тренажера должна сохраняться.

### Математическая модель. Методы исследования

Гидравлические системы платформы, как правило, работают в стационарных режимах. Однако при введении или возникновении неисправностей, таких как обрыв штоков клапанов или срабатывание различных систем автоматики, возникают ударные волновые процессы. Подобные явления характерны для любых видов береговых терминалов и танкеров. Интенсивность волны зависит от продолжительности (времени) и последовательности срабатываний, геометрии клапанов и их расположения в системе трубопроводов, а также от относительного перепада давлений. Динамика возникающих течений ввиду опасности и высокой стоимости натуральных экспериментов мало изучена и практически не освещена в литературе. Недостаток информации о происходящих процессах приводит при эксплуатации к серьезным последствиям: повреждению труб и системы в целом, загрязнению окружающей среды.

Основной задачей математической модели ледостойкой платформы является описание нестационарного поведения системы для решения подобных задач. Она позволяет эмулировать предаварийные и поставарийные состояния для учебно-тренировочных задач.

### Математическая модель фрагмента тренажера

Рассмотрим математическую модель фрагмента тренажера, которая позволяет рассчитать нестационарные процессы в выделенных участках систем, и используется в качестве эмулятора динамических процессов.

Движение изотермического нестационарного потока сжимаемой жидкости в трубопроводе переменного сечения  $S$  можно описать следующими дифференциальными уравнениями (ДУ) [1]:

– уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u S)}{\partial x} = 0,$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $x$  – пространственная координата, м;

– уравнением сохранения импульса для вязкой жидкости:

$$\frac{\partial(\rho S u)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u^2 S + p S)}{\partial x} = -\tau_w \cdot \chi + p \cdot \frac{\partial S}{\partial x},$$

где  $\chi$  – периметр трубопровода,  $\tau_w$  – напряжение трения (сдвига) и  $\tau_w \cdot \chi = 2 \cdot \rho \cdot S \cdot u \cdot k$ ;

– уравнением состояния жидкости:

$$p = B(t) \cdot \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_{at}} \right)^\gamma - 1 \right],$$

где  $B(t)$  – постоянная уравнения состояния жидкости, МПа;  $\rho_{at}$  – плотность жидкости при атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup> р.

Эти уравнения позволяют описать и переносное течение жидкости, и распространение ударных волн.

Упрощенный эмулятор на основе акустического приближения, для которого плотность и скорость звука в среде считаются постоянными, описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial \tau} + \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} &= -2 \cdot k \cdot \rho \cdot u \end{aligned} \right\}.$$

Система решается методом характеристик в интерпретации, который позволяет за счет привлечения дополнительных узлов в процессе вывода расчетных формул более корректно выполнить переход к граничным объемам. В этом случае используются зависимости:

– для расчета давления и скорости во внутренних точках области [2]:

$$\left. \begin{aligned} P_m^{n+1} \cdot (1+b) &= \frac{P_{m+1}^n + P_{m-1}^n}{2} + b \cdot P_m^n - \rho \cdot a \cdot (1-b) \cdot \frac{U_{m+1}^n + U_{m-1}^n}{2} \\ U_m^{n+1} \cdot (1+b)^2 &= \frac{P_{m+1}^n + P_{m-1}^n}{2 \cdot \rho \cdot a} + \left( U_m^n \cdot b + \frac{U_{m+1}^n + U_{m-1}^n}{2} \right) \cdot \frac{b-1}{b+1} \end{aligned} \right\},$$

где  $P$  – давление в точке, Па;  $U$  – скорость потока, м/с;  $a$  – скорость распространения волн, м/с.

для левой границы:  $P_o^{n+1} - \rho \cdot a \cdot U_o^{n+1} \cdot (1+b) = \frac{P_1^n + b \cdot P_o^n}{1+b} - \rho \cdot a \cdot \frac{1-b}{1+b} \cdot (U_1^n - b \cdot U_o^n)$ , для правой

границы:  $P_M^{n+1} - \rho \cdot a \cdot U_M^{n+1} \cdot (1+b) = \frac{P_{M-1}^n + b \cdot P_M^n}{1+b} - \rho \cdot a \cdot \frac{1-b}{1+b} \cdot (U_{M-1}^n - b \cdot U_M^n)$ .

Для отыскания значений  $P$  и  $U$  в граничных точках уравнения должны решаться совместно с разной аппроксимацией соответствующих граничных условий.

Для определения параметров трубопровода равномерного сечения находим параметры на границе по известным параметрам в участках слева и справа от нее по полной процедуре распада Годунова. Для жидкости, с уравнением состояния Тейта, используем итерационный процесс, реализованный на базе метода Ньютона. Это позволяет определить параметры в ударных и интенсивных волнах разряжения, а также при переносном течении. Массовая скорость звука в этом случае определяется из равенств [3]:

$$m(P_{kp}, p, \rho) = \begin{cases} = a \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{P_i \cdot (\gamma + 1) + (\gamma - 1)}{2 \cdot \gamma}} & \text{при } P_{kp} \geq p \\ = a \cdot \rho \cdot \frac{\gamma - 1}{2 \cdot \gamma} \cdot \left[ \frac{1 - P_i}{1 - P_i^{2\gamma}} \right]^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} & \text{при } P_{kp} < p \end{cases},$$

$$f'(P_{kp}, p, \rho) = \begin{cases} = \frac{P_i \cdot (\gamma + 1) + 3 \cdot \gamma - 1}{a \cdot \rho \cdot 4 \cdot \gamma \cdot ((P_i \cdot (\gamma + 1) + \gamma - 1) / 2\gamma)^{2/3}} & \text{при } P_{kp} \geq p \\ = \frac{a \cdot P_i^{2\gamma}}{\gamma \cdot (P_{kp} + B)} & \text{при } P_{kp} < p \end{cases},$$

где  $a = \sqrt{\gamma \cdot (p + B) / \rho}$ ;  $P_i = (P_{kp} + B) / (p + B)$ .

После того, как итерации относительно  $P_{kp}$  сойдутся, определяется скорость контактного разрыва:

$$U_{kp} = \frac{m_n \cdot u_n + m_b \cdot u_b + p_n - p_b}{m_n + m_b},$$

где  $m_n$  и  $m_b$  – величины  $m(P_{kp}, p, \rho)$ , полученные при значениях  $p_n, \rho_n$  и  $p_b, \rho_b$  соответственно. Если приближенно принять, что массовая скорость  $m = a\rho$ , то мы перейдем к упрощенной процедуре Годунова.

На втором этапе определим средние параметры на каждом участке на новом временном шаге. На участке размером  $\Delta x$  процесс рассматривается в течение малого промежутка времени  $\Delta \tau$  – такого, чтобы выполнялся критерий Куранта. Законы сохранения и уравнение состояния позволяют вычислить эти средние значения:

$$\rho^\tau = (\rho \cdot V_\tau + d\tau \cdot (R_n U_n S_n - R_b U_b S_b)) / V^\tau,$$

$$u^\tau = \frac{u \cdot \rho \cdot V_\tau + d\tau \cdot (R_n U_n^2 S_n + S_n (P_n - p^*) - R_b U_b^2 S_b - S_b (P_b - p^*))}{V^\tau \cdot \rho^\tau} - \frac{2 \cdot k \cdot \rho \cdot V_\tau \cdot u \cdot d\tau}{V^\tau \cdot \rho^\tau},$$

$$p^\tau = f(\rho^\tau).$$

Здесь индексами  $n$  и  $b$  обозначены параметры соответственно на левой и правой границе участка. Согласно накопленному опыту расчетов по данной модели рекомендуется выбирать величину  $p^*$  (давление на боковую стенку) не в виде кусочно-постоянного распределения параметров  $p^* = P_\tau$ , а в виде кусочно-линейного  $p^* = 0,5(P_n + P_b)$ , что повышает точность вычислений.

Полученные в результате расчета величины  $p^\tau, u^\tau, \rho^\tau$  приближенно описывают состояние газа в момент времени  $\tau = \tau_0 + 1 \cdot \Delta \tau$ . Если их принять за начальное состояние и опять провести расчет по описанной выше схеме, то получим параметры в момент времени  $\tau = \tau_0 + 2 \cdot \Delta \tau$  и т. д.

Для моделирования процессов в реальных трубопроводных системах необходимо уметь решать задачи закрывающихся клапанов, случаев конечных объемов или стоков [4]:

1. Пусть имеется левая непроницаемая неподвижная стенка. Решаем задачу о распаде разрыва при условии, что в качестве левых параметров берутся  $(p_b, \rho_b, -u_b)$ , а в качестве правых –  $(p_b, \rho_b, u_b)$ , которые отличаются только знаком скорости. Для моделирования правой непроницаемой стенки в качестве левых параметров берутся  $(p_n, \rho_n, -u_n)$ , а для правых –  $(p_n, \rho_n, u_n)$ .

2. Рассмотрим случай движения левой непроницаемой стенки со скоростью  $W(\tau)$ , которая изменяется в рамках временного шага, но является постоянной при расчете распада-разрыва ( $W=const$ ). Сначала нужно решить задачу о распаде разрыва, в которой в качестве параметров слева от границы берем значения  $(p_b, \rho_b, -u_b+W)$ , а справа  $-(p_b, \rho_b, u_b-W)$ . В случае подвижности правой стенки нужно взять параметры слева от границы  $(p_n, \rho_n, u_n-W)$ , а в качестве правых величин  $-(p_b, \rho_b, -u_b+W)$ . Однако следует обратить внимание на то, что величина объема участка при подвижной стенке зависит от времени, поэтому берем  $V = f(W(\tau))$  с предыдущего шага.

3. Пусть имеется сток, расположенный слева. Для этого на первом этапе решаем задачу о распаде разрыва при условии, что в качестве левых параметров берутся  $(p_b, \rho_b, u_b)$ , а правых  $-(p_b, \rho_b, u_b)$ , которые ничем не отличаются. Для моделирования правого стока в качестве левых берутся параметры  $(p_n, \rho_n, u_n)$ , а правых  $-(p_n, \rho_n, u_n)$ .

4. Для расчетов по накопительному танку переходим к использованию процедуры со скачком площади поперечного сечения при  $S \rightarrow$  к большому числу [1].

Во всех перечисленных случаях расчет на втором этапе выполняется по обычной процедуре участка.

### Изотермическая модель квазистационарного потока несжимаемой жидкости

Отметим отличие принципов положенных в основу численного моделирования, применяемого для тренажеров, от научных расчетов, а также рассмотрим основные положения, заложенные в реализацию опорного расчета.

Для описания сложной топологии системы применены принципы решения сетевой задачи, для которой необходимо определить функции проводимости элементов сети  $f(p, q, z)\alpha\beta = 0$ . Элементы должны быть описаны таким образом, чтобы было обеспечено получение решения в заданной области. Сам расчет единичного цикла для всей сети должен выполняться на компьютере за время:  $\tau_{max} < 0,5$  сек ( $\tau_{opt} < 0,3$  сек), а в случае программных сбоев или вычислительной «аварии» расчета требовался бы минимальный набор информации для его восстановления [4].

Рассмотрим подходы к записи функций проводимости опорного расчета, выполненные в рамках квазистационарного метода моделирования процессов, для которого все квазистационарные эффекты и фазовые превращения многокомпонентных сред реализуются за счет объектов типа Танк.

В статье изложены причины, по которым в процессе развития тренажера применялись разные методы описания объектов системы. Наиболее значимые из них исследуются и их зависимости специальным образом готовятся и записываются в виде математических функций проводимости  $f(x, y, z) = 0$ . Вид функции воспроизводит характеристики объектов с учетом основных законов сохранения массы и энергии и обеспечивает возможность разрешения уравнений численного алгоритма.

Научный расчет обеспечивает высокую точность параметров для узкого диапазона эксплуатационных или специальных режимов работы системы, для которых он создавался. Начальное приближение заранее известно и задается значением, близким к области предполагаемого решения, что обеспечивает дополнительную точность и определенность в поиске региона решения. Затраты вычислительных ресурсов не регламентированы и могут быть любыми.

Моделирование в тренажерах выполняется на широкодоступных компьютерах и для следующих расчетов:

1. Внешних проявлений (параметров) системы, которые обучаемый в состоянии непосредственно наблюдать. То есть вместо создания моделей, включающих сложную динамику поведения, детальную иерархию, внутреннюю структуру и конструкцию объекта мы используем описание его минимально необходимым набором зависимостей, создающих только иллюзию работы и поведения объекта, а также обеспечивающих максимальную скорость вычислений. К видимым параметрам относим величины, фиксируемые датчиками

системы управления в точках их регистрации: давление жидкости, ее расход, число оборотов двигателей, а также температуру.

2. Широкого диапазона эксплуатационных параметров систем, в котором требуется только качественное совпадение результатов и тенденций, проходящих через опорные точки. Поэтому допускается грубое приближение в формулах и отдельных зависимостях, которые, однако, должны обеспечивать соблюдение основных законов сохранения массы и энергии для системы и объекта в целом.

3. Поведение системы в области аварийных и поставарийных состояний, которые существенно отличаются от области обычных эксплуатационных параметров (после выкипания жидкости моделируется нагрев поверхности, ее разрушение и последствия, что обычно выходит за рамки научных расчетов).

4. Начального приближения, которое, в отличие от научных расчетов, часто заранее неизвестно и его сложно предсказать, что существенным образом влияет на точность вычислений. Поэтому очень важен четкий инженерный выбор круга решаемых задач, то есть диапазон эксплуатационных и аварийных ограничений на степень свободы системы.

5. В режиме реального времени, таким образом, чтобы модель сходилась к решению за  $t_{max} < 0,5$  сек ( $t_{opt} < 0,3$  сек.). В фоновом режиме расчет может выполняться не более чем 3-4 мин.

Для построения опорного расчета системы сложной топологии применены принципы решения сетевой задачи. Согласно этому подходу гидравлическая система, состоящая из трубопроводов и их сочленений может быть представлена в виде множества вершин  $V = \{v1, v2, \dots, vn\}$  и связей в виде ребер  $E = \{e1, e2, \dots, en\}$ , которые образуют неориентированный граф  $G = \{V, E\}$ . Трубопроводы (и их разновидности: подогреватели, клапаны, компенсаторы, насосы и пр.) являются ребрами графа  $G$ , для которых вводится переменная  $q_{\alpha\beta}$  (расход). Сочленения трубопроводов образуют вершины графа  $G$ , для которых вводится переменная  $p_{\alpha}$  (давление).

Будем считать, что гидравлическая сеть является связной, то есть для любых  $V$  существует цепочка связей (путей) вида  $(v1 \rightarrow v2, e1), (v2 \rightarrow v3, e2), \dots, (en, )$ . Для переменных ребра  $(q_{\alpha\beta}, p_{\alpha}, p_{\beta}, z)$  запишем общую систему уравнений, руководствуясь следующими принципами:

1. Для любого ребра  $(e1, \dots, en)$  задана функция проводимости течения:  $f(p, q, z)_{\alpha\beta} = 0$ , которая должна обладать следующими свойствами:

- быть непрерывной по переменным  $p$  и  $q$ ;
- являться строго изотонной по  $p$  и строго антитонной по  $q$ ;
- $f(p, q, z)_{\alpha\beta} = -f(p, q, z)_{\beta\alpha}$ ;
- принимать неограниченные значения при  $p$  или  $q$ , стремящихся к  $\pm$  бесконечности.

Необходимо записать уравнение в таком виде, который обеспечит возможность его решения в широком диапазоне величин, возникающих в процессе итераций.

2. Уравнение массового баланса несжимаемой жидкости для узла сети имеет вид:

$$\sum_{\alpha} q_{\alpha\beta} = 0.$$

В каждом узле втекающий расход равен вытекающему.

3. Уравнения граничных узлов определяют характер внешнего воздействия на сеть в виде переменных танков и функций стоков:

$$f(p_o, q_o, z_o)_{\alpha\beta} = 0.$$

Оно позволяет имитировать квазистационарное поведение объектов в разные промежутки времени счета. В перечисленных случаях сетевая задача сводится к поиску значений переменных  $q_{\alpha\beta}$ ,  $p_{\alpha}$  и  $p_{\beta}$ , которые должны удовлетворять граничным условиям, а течение во всех внутренних узлах и ребрах определяется заданной системой уравнений.

Одномерный квазистационарный поток вязкой жидкости может быть описан уравнениями сохранения массы и энергии [1]:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \cdot u_1 \cdot S_1 &= \rho_2 \cdot u_2 \cdot S_2 \\ Z_1 \cdot \rho_1 \cdot g + p_1 &= Z_2 \cdot \rho_2 \cdot g + p_2 + \Delta P_{TP} - \Delta L_{TEX} + \rho \cdot \frac{du}{d\tau} \end{aligned} \right\}.$$

Будем считать, что изменение сечения трубы происходит только в узлах ( $S_1 = S_2$ ), а плотность меняется мало ( $\rho_1 = \rho_2$ ), уравнение сохранения массы – вырождается ( $u_1 \sim u_2$ ). Для трубы получим:

$$[p_1 - p_2] + (Z_1 \cdot \rho_1 - Z_2 \cdot \rho_2) \cdot g - \Delta P_{TP}(u) + \Delta L_{TEX} - \rho \cdot \frac{du}{d\tau} = 0.$$

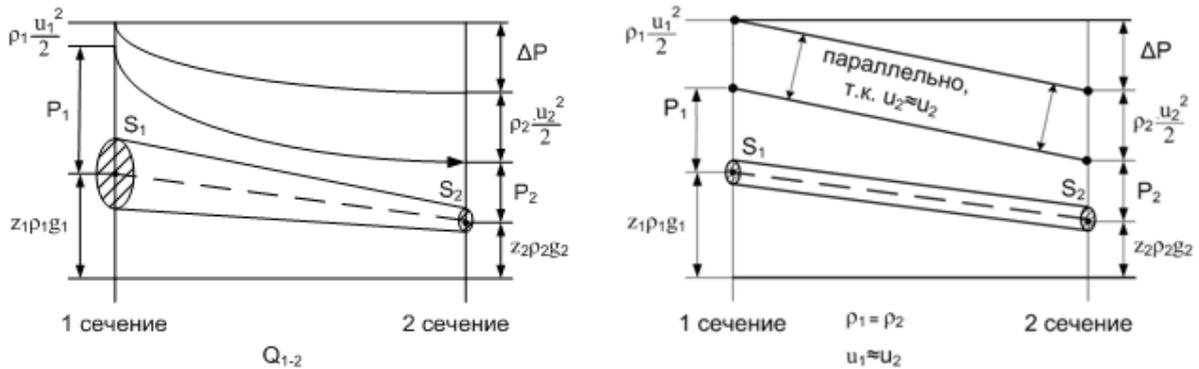


Рис. 5. Пояснения к расчетам

Последний член уравнения (обозначим его  $\Delta H_i$ ) учитывает инерционную составляющую, а нивелирный напор учитывается членом  $\Delta P_h = (Z_1 \rho_1 - Z_2 \rho_2) g$ , который позволяет выполнять и расчет естественной тяги, так как учитывает разницу давлений по высоте (вверху  $P_1$ , а внизу  $P_2 = P_1 + Z_2 \cdot \rho_2 \cdot g$ ). Но мы будем считать все окружающее давление одинаковым по высоте и равным  $P_{air}$ . Поэтому если ввести в уравнение нивелирного напора плотность окружающего воздуха  $\rho_{air}$ , в котором происходит всплытие газообразных сред, то получим:

$$\Delta P_h = (Z_1 (\rho_1 - \rho_{air}) - Z_2 (\rho_2 - \rho_{air})) \cdot g.$$

Сопротивление трения  $\Delta P_{TP}$  при стабилизированном течении однофазного потока в трубах складывается из двух составляющих: потерь на трение по длине  $\Delta P_L$ , и местных потерь  $\Delta P_M$ . Преобразуем уравнение течения к виду удобному для описания функции проводимости сетевой задачи так, чтобы:

– однозначно определить кривую в области отрицательных расходов. Для этого выполним замену  $u_1^2$  на  $u_1 |u_1|$ ,

– завязать потери на трение при ламинарном режиме течения для обеспечения стабилизации счета. В этом случае зависимость, позволяющая решать круг задач LCHS тренажеров, имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{TP} &= \Delta P_L + \Delta P_M = \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \xi_M \right) \cdot \frac{\bar{\rho} \cdot u_1^2}{2} = \left( \max(\lambda; \lambda_{kr}) \cdot \frac{L}{d} + \xi_M \right) \cdot \frac{\bar{\rho} \cdot u_1^2}{2} \approx \\ & \max(\lambda; \lambda_{kr}) \cdot \frac{L}{d} \left( 1 + \xi_M \frac{d}{L \cdot \lambda_{kr}} \right) \cdot \frac{\bar{\rho} \cdot |u_1| \cdot u_1}{2} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{d} \cdot \left( 1 + \xi_M \frac{d}{L \cdot \lambda_{kr}} \right) \cdot \max \left( \frac{64 \cdot \nu_i}{d}; \lambda_{kr} \cdot |u_1| \right) \cdot u_1 \cdot \bar{\rho} \end{aligned}$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения в трубе,  $L$  – ее длина,  $d$  – диаметр,  $\xi_M$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления, вычисляемый по геометрическим размерам сечений и режиму течения;  $\bar{\rho} = 0,5 (\rho_1 + \rho_2)$ .

Затем перейдем к массовым  $q_1$  расходам: тогда  $u_1 = q_1 / (S_1 \rho_1)$  и из функции  $\max$  вынесем множитель  $\lambda_{kr} / S^2$ . Дополним  $\Delta P_{TP}$  трения трубы двумя функциями коррекции параметров  $k(pos)$  и  $correct(q)$ :

$$\Delta P_{TP} = \frac{k(pos)}{2} \cdot \frac{L}{d} \cdot \left(1 + \xi_M \frac{d}{L \cdot \lambda_{kr}}\right) \cdot \frac{\lambda_{kr}}{S^2} \cdot \max\left(\frac{64 \cdot S \cdot v_i}{d \cdot \lambda_{kr}}; \frac{|q|}{\rho}\right) \cdot q + correct(q),$$

$$\Delta P_{TP} = k(pos) \cdot \left(\frac{L \cdot \lambda_{kr}}{d} + \xi_M\right) \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{S^2}\right] \cdot \max\left(\left[\frac{64 \cdot S \cdot v_i}{\lambda_{kr} \cdot d}\right]; \frac{|q|}{\rho}\right) \cdot q + correct(q),$$

где  $\left(\frac{L \cdot \lambda_{kr}}{d} + \xi_M\right)$  – настроечный параметр, и  $const: ReLam = \left[\frac{64 \cdot S \cdot v_i}{d \cdot \lambda_{kr}}\right]$ ,  $Lam = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{S^2}\right]$ ,

$correct(q)$  – функция коррекции параметров, которая может использоваться для изменения и настройки поведения характеристики объекта,  $k(pos)$  – масштабирующая функция коррекции параметров, которая определяется в зависимости от позиции дросселирующего органа.

Окончательная запись функции проводимости ребра для течения вязкой несжимаемой жидкости в трубе, насосе, регулирующем и невозвратном клапане [4]:

$$f(p, q, z)\alpha\beta = p_1 - p_2 + [Z_1 \cdot (\rho_1 - \rho_{air}) - Z_2 \cdot (\rho_2 - \rho_{air})] \cdot g + \Delta L_{TEX} \cdot b_{12}(1;0) - \Delta H_i \cdot b_{12}(1;0) -$$

$$- k(pos) \cdot \left(\frac{L \cdot \lambda_{kr}}{d} + \xi_M \cdot b_{12}(1;0)\right) \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{S^2}\right] \cdot \max\left(\left[\frac{64 \cdot S \cdot v_i}{\lambda_{kr} \cdot d}\right]; \frac{|q_{12}|}{\rho}\right) \cdot q_{12} - correct(q_{12}) = 0$$

$$\text{или } f(p, q, z)\alpha\beta = p_1 - p_2 + \Delta P_h + \Delta L_{TEX} - \Delta H_i - \Delta P_{TP} = 0,$$

$$\text{где } \begin{cases} p_{1(left)} & q_{12}(+) \rightarrow p_{2(right)} \\ & Flow \gg \end{cases}$$

Нетрудно убедиться, что это – квадратное уравнение относительно расхода  $q$ , которое содержит неизвестные  $p_1$  и  $p_2$ . Определение их и  $u_{12}$  является главной целью сетевой задачи. Для этого уравнения описания поведения течения жидкости в трубах (ребрах) должны быть дополнены уравнениями сохранения массы в узлах ( $S q = 0$ ). В этом параграфе рассмотрено только уравнение ребра, где приведенные коэффициенты рассматриваются отдельно для каждого объекта:

–  $b_{12}(1;0)$  – логические функции;

–  $\Delta L_{TEX}$  – техническая работа, которая является функцией внешних воздействий на сеть: она положительна, если энергия вносится внешним источником в поток (например насосом), и отрицательна, если энергия забирается от потока;

–  $\Delta H_i$  – работа сил инерции, препятствующая движению потока. Для плавно меняющегося по длине трубы давления и течения она определяется по ускорению потока:  $\Delta H_i = L \cdot \rho \cdot du/d\tau = L \cdot dq/d\tau \sim (q - q_\tau) L / \Delta \tau$ , где  $q_\tau$  – массовый расход с предыдущего шага счета. Величина  $\Delta H_i$  имеет знак, который совпадает с потерями на трение, если тормозит поток, и противоположный, если его разгоняет.

Дополнительно величина  $\Delta H_i$  позволяет учитывать напряжение сдвига и выступать физическим демпфером при неустойчивости расчета. Наличие разности  $dq = q - q_\tau$  позволяет автоматически следить за знаками  $\Delta H_i$ , а в случае несущественного отклонения  $\Delta H_i$  считать ее нулевой.

Программная реализация, описание архитектуры и алгоритмов математической модели. Взаимодействие ее с тренажерным комплексом

#### Термины и определения:

Console (консоль) – приложение, являющееся частью рабочего места обучаемого, осуществляющее все основное диалоговое взаимодействие между пользователем с одной стороны и моделью технологического объекта с другой.

Instructor (консоль инструктора) – приложение, являющееся частью рабочего места инструктора, осуществляющее все основное диалоговое взаимодействие между пользователем с одной стороны и моделью технологического объекта с другой.

Model (модель) – приложение, являющееся частью рабочего места обучаемого и содержащее математическую модель, а также выполняющее функции организации хранения и доступа к данным моделирования для остальных приложений.

LCS – приложение, являющееся частью рабочего места обучаемого и (или) инструктора и служащее исключительно для запуска следующего приложения (а также в целях лицензирования).

LR – автономное приложение, являющееся частью рабочего места обучаемого или инструктора, служащее для расчета остойчивости, прочности и уровней в танках судна, являющееся, по сути, частью расчетной модели, однако обладающее собственным пользовательским интерфейсом и производимое в другой фирме.

Visualisation (визуализация) – приложение, являющееся частью места обучаемого или инструктора, служащее для трехмерного отображения объекта моделирования.

Plotter (плоттер) – приложение, являющееся частью места обучаемого или инструктора, позволяющее отслеживать и сравнивать изменения во времени различных данных, рассчитываемых Model.

«Упражнение» – файл, сохраняющий в себе единственное и полное состояние приложения Model, которое используется для установки его начальной ситуации. Для этого несколько таких файлов включается в поставляемую конфигурацию. Используется для сохранения текущего состояния приложения Model для любых целей обучения. Может быть прочитан с диска приложением Model.

TrnNetwork – сетевая библиотека компании «Транзас», обеспечивающая решение следующих задач:

- сетевой обмен в распределенной системе;
- лицензирование;
- конфигурирование распределенной системы;
- запуск распределенной системы.

Схема взаимодействия основных компонентов тренажерного комплекса представлена на рис. 6.

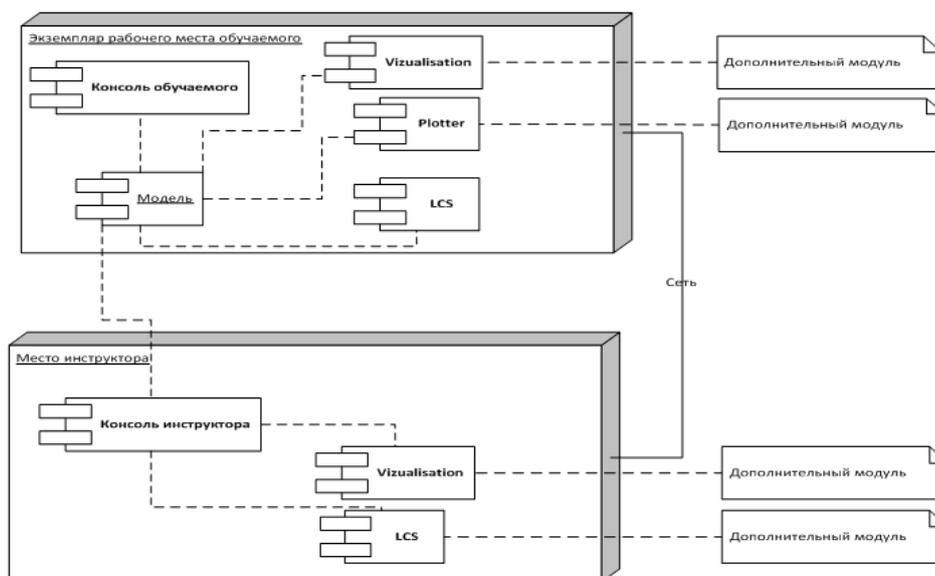


Рис 6. Диаграмма распределения модулей

Математическая модель – это программа, написанная на языке С++ и включающая в себя все математические выкладки, описанные выше.

Для организации вычислительного алгоритма важна правильная организация структуры данных модели, что может давать значительный выигрыш в скорости и эффективности вычислений.

По форме все данные модели, которые используются тренажером, можно разделить на три мэпа:

– CModel – хранит полные данные модели на локальной машине (часть из них используется для обмена, а другая – для внутренних расчетов);

– Mnb – хранит данные, необходимые для возобновления расчета, которые участвуют в сетевом обмене ( $Mnb \subset CModel$ ). Часть данных CModel вычисляется моделью самостоятельно, и они не участвуют в сетевом обмене, выступая в роли служебных переменных;

– MnV – хранит данные необходимые для обмена в сети. Область пересечения данных CModel и MnV дают Mnb (рис. 7).

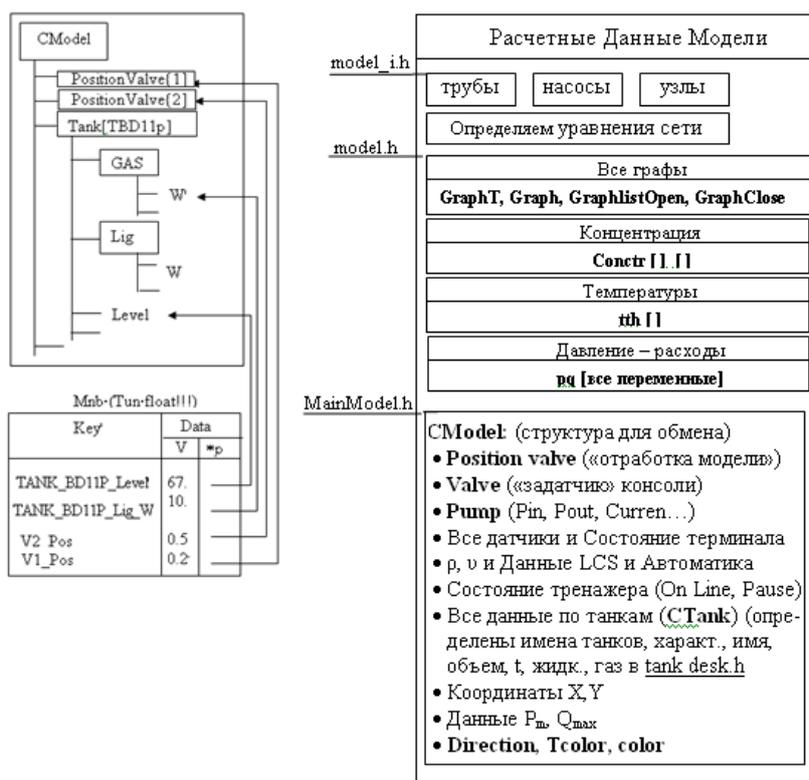


Рис. 7. Иллюстрация организации данных в виде Map и расчетные данные модели

## Выводы

В отличие от пакетов для научных расчетов, таких как FEM, HYSYS и т. д., созданная модель, позволяет в режиме реального времени итерационными методами производить расчет параметров в 150-и различных емкостях и танках, расположенных на борту ледостойкой платформы. Это, в свою очередь, позволяет использовать модель не только в составе учебных тренажерных классов, но и в системах прогнозирования развития аварийных ситуаций, а также для многовариантных оптимизационных расчетов.

В процессе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Изучены международные документы, на основе которых сформированы функции и перечень систем тренажера морской ледостойкой платформы, а также определены основные допущения к математической модели.

2. Разработана численная схема счета процессов в различных элементах гидравлической системы, которая позволяет учесть всю сложность конфигурации трубопроводов, многообразие ее элементов и учитывает зависимость плотности среды от давления.

3. С учетом специфики тренажерной задачи и свойств среды структурированы и раздельно записаны уравнения для жидкости и газа.

4. Выполнена проработка и показана реализация наиболее важных квазистационарных эффектов и фазовых превращений среды в малых граничных объектах и трубах.

5. Полученная математическая модель реализована на языке высокого уровня C++.

6. Математическая модель интегрирована в Тренажерный комплекс Transas Shelf 6000 «Технологическая платформа», производства компании ЗАО «Гранзас».

Таким образом, на основе использования описанных методов моделирования в составе единой математической модели виртуального судна, реализованного для МЛСП, удалось смоделировать поведение самых различных морских плавучих объектов, находящихся в различных режимах эксплуатации на континентальном шельфе при разных внешних воздействиях. Созданная модель позволяет подготовить основных специалистов плавучей установки к повседневной ее эксплуатации и эксплуатации в аварийных ситуациях.

### Публикации

1. Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Технологическая платформа / свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2011616397.
2. Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Тренажер газового терминала LCHS Gas (ТГТ) / свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2011610224.
3. Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Тренажер грузобалластных операций на сухогрузных судах LCHS 6000 Cargo (ТГОСС) / свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2011610225.
4. Белентьев А.В., Поселеннов А.А., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А. Тренажер морской нефтедобывающей платформы (Добыча 2011) / свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2011610227.
5. Белентьев А.В., Смирнов Р.И., Поселеннов А.А., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Малюгин А.А. Тренажер полупогружной буровой установки FOS 6000 (ТПБУ) / свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2011610228.
6. Казунин Д.В., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Ганс Е.С., Смирнов Р.И., Маценко С.В., Хвастунов А.П. Создание динамических средств обучения для подготовки специалистов, связанных с добычей углеводородного сырья на Арктическом шельфе // Морской вестник. 2010. № 4 (36). С. 95–98.
7. Казунин Д., Хвастунов А., Бутурлимов О., Рыбий В., Смирнов Р. Тренажер грузобалластных операций сухогрузного судна // Мат-лы международной научно-практической конференции «Водный транспорт России: Инновационный путь развития» (6–7 октября 2010 г.). Т. 2. СПб., 2011. С. 290–296.
8. Бутурлимов О., Рыбий В., Хвастунов А., Смирнов Р., Казунин Д. Тренажер плавучей полупогружной буровой установки // Мат-лы международной научно-практической конференции «Водный транспорт России: Инновационный путь развития» (6–7 октября 2010 г.). Т. 2. СПб., 2011. С. 273–277.
9. Смирнов Р.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами / патент RU 116253.
10. Смирнов Р.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В. Тренажер морских нефтедобывающих платформ / патент на полезную модель № 104359.

### Литература

1. Казунин Д.В., Бутурлимов О.В. Оценка свойств перекачиваемых сред на основе метода обобщенных параметров в широком диапазоне состояний // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. 2006. Прил. № 1. С. 32–40.
  2. Кирилин В.А., Сычев В.В. и др. Техническая термодинамика. М., 1983. – 416 с.
  3. Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика. Л., 1958. – 338 с.
- Казунин Д.В., Антипин А.В. Уравнение состояния топлив // Сб. научных трудов НГМА. Вып. 1. Новороссийск, 1996. С. 161–166.



Соколов Юрий Александрович  
Факультет фотоники и оптоинформатики  
Кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики  
E-mail: sokolov-juri@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ФУРЬЕ-МЕТОДА КОНТРОЛЯ МАЛЫХ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Ю.А. Соколов

Научный руководитель – доцент В.Н. Назаров

### Введение

В настоящее время для юстировки, а также для проведения линейных и угловых измерений в приборостроении и машиностроении широко применяются различные оптические, оптико-механические и оптико-электронные приборы и датчики. Автоколлиматоры широко используются во многих задачах угловых измерений [1]. Особо важными являются точные угловые измерения для технологий, связанных с разработкой и созданием систем навигации и ориентации, в том числе точных гироскопов, кодовых датчиков угла, авиационных, космических и морских систем навигации и астроориентации, а также при создании крупногабаритных оптических систем и большебазных интерферометров.

В современных прецизионных автоколлиматорах в качестве фотоприемного устройства широко используются матричные фотоприемники – ПЗС-линейки и матрицы. Достоинствами таких приборов перед визуальными автоколлиматорами является большее угловое разрешение, точность и воспроизводимость результатов измерения, поскольку они (результаты измерения) не зависят от индивидуальных параметров зрения, тренированности и внимания оператора. Еще одним достоинством фотоэлектрических автоколлиматоров является большая скорость измерений. Автоколлиматоры, выпускаемые иностранными фирмами «TRIOPTICS», «MOELLER-WEDEL», имеют чувствительность (1–0,005)″, погрешность измерения (3–0,01)″ [2, 3]. Недостатками фотоэлектрических автоколлиматоров являются: высокая стоимость; большие габариты, вызванные необходимостью использования длиннофокусных объективов для достижения высокой чувствительности  $f = (100–1000)$  мм; невозможность изменения чувствительности и диапазона измерений.

Альтернативой таким автоколлиматорам служат различные когерентно-оптические схемы контроля, использующие волновую природу света. Данные методы обладают рядом достоинств, главные из которых: высокая чувствительность и точность, простота, дешевизна и малые габариты конструкции. Недостатками их являются: значительно меньший диапазон измерений при сравнимой чувствительности [4]; сложность конструкции при большом диапазоне измерений [1]; специфичность конструкции, которая делает невозможным использование схемы для автоколлимационных измерений, но обладает высокой чувствительностью и большим диапазоном измерений при использовании схемы в качестве углоизмерительного датчика [5].

Цель работы – исследование нового метода дифракционного контроля малых угловых и линейных величин на основе схемы дифракционного интерферометра и применение полученных результатов для создания средств измерения угловых и линейных величин, обладающих большей чувствительностью, точностью, компактностью и простотой реализации по сравнению с ныне существующими фотоэлектрическими и дифракционными угломерами.

Задачи, решаемые в работе:

- анализ процесса формирования интерференционной картины и ее свойств в дифракционном интерферометре;
- разработка математических моделей, описывающих распределение интенсивности света в плоскости регистрации;

- расчет чувствительности схем с различными конструктивными параметрами к угловым и линейным смещениям;
- создание экспериментального макета для проверки основных положений теоретической части работы.

Общая методика проведения исследований: в теоретической части работы преобразования световых полей в дифракционном интерферометре рассматриваются с помощью математических методов теории систем и интегральных преобразований в оптике. Оценка метрологических возможностей схемы, расчет необходимых конструктивных параметров и моделирование ее работы проводились с помощью персонального компьютера. Проверка основных теоретических положений и математических моделей выполнялась экспериментальным путем, а обработка и анализ экспериментальных интерферограмм – с помощью персонального компьютера в среде Mathcad.

### Оптическая схема дифракционного интерферометра

Общий вид исследуемой схемы представлен на рис. 1. Здесь около линзы установлены два объекта в виде щелевых апертур, на которые под наклоном падает пучок излучения от лазерного источника.

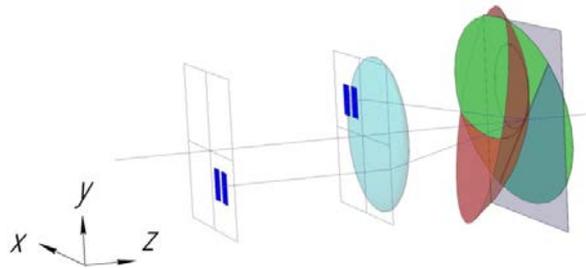


Рис. 1. Общий вид исследуемой оптической схемы дифракционного интерферометра

На рис. 2 показано, как меняется форма поверхности, на которой формируется Фурье-образ апертуры при продольном и поперечном смещениях щели относительно линзы [6].

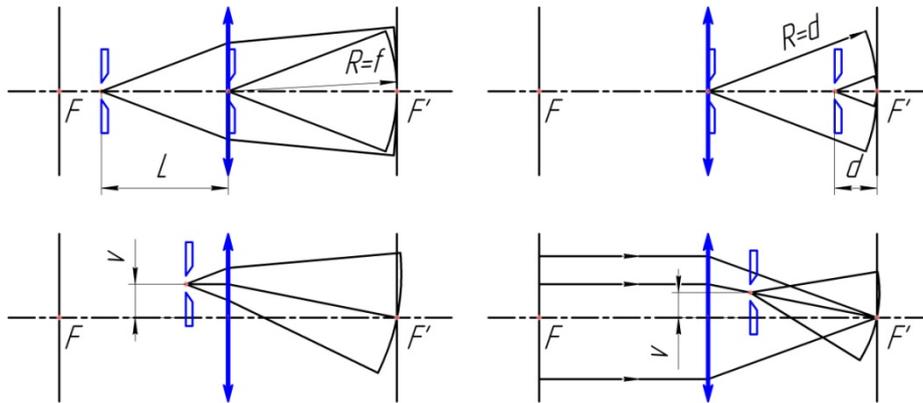


Рис. 2. Влияние положения апертуры, находящейся около линзы, на поверхность локализации ее Фурье-спектра

Как видно на рис. 1 и 2, если около объектива расположено две щели, то в его фокальной плоскости наблюдается картина интерференции двух сферических волн, радиус и наклон которых зависят от положения щелей относительно объектива. Это открывает возможность контроля положения одной из апертур относительно линзы по различным параметрам интерференционной картины. Качественный вид интерференционной картины от двух щелевых апертур показан на рис. 3.

Важное свойство данной интерференционной картины в том, что центр ее наиболее широкой области (более удобной для измерений) статичен при любых углах падения излучения на систему, и его ширина постоянна (определяется продольным расстоянием между апертурами  $S = L_1 - L_2$ ).

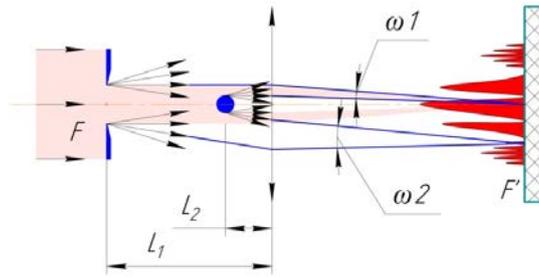


Рис. 3. Образование интерференционной картины с переменной шириной полос

При расположении апертур на оси системы центр наиболее широкой интерференционной полосы будет всегда находиться в задней фокальной точке объектива.

При изменении угла падения излучения  $\alpha$  на систему между волновыми фронтами, которые образуются за апертурами, будет возникать дополнительная разность фаз  $\Delta(\alpha)$ . Это следует из неравенства оптических путей  $S$  и  $S'$  (рис. 4).

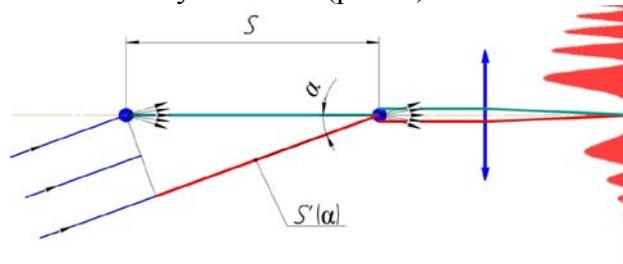


Рис. 4. Схема образования разности фаз между щелевыми апертурами

Из рис. 4 следует, что оптический путь  $S'(\alpha)$  можно определить как:

$$S'(\alpha) = S \cdot \cos(\alpha). \quad (1)$$

Разность фаз между лучами, дифрагировавшими по оси системы:

$$\Delta(\alpha) = S \cdot [1 - \cos(\alpha)]. \quad (2)$$

Возникновение дополнительной разности фаз между интерферирующими фронтами приводит к изменению интенсивности интерференционных полос и их смещению на приемнике. Данный эффект открывает возможности контроля угла падения излучения или перемещения апертур (продольного или поперечного).

### Оценка потенциальной чувствительности схемы к изменению угла падения излучения

Для оценки потенциальной чувствительности схемы заменим на рис. 4 щелевые апертуры точечными источниками излучения. При этом оптические пути, которые проходят волны перед интерференцией от каждого из источников, положим равными  $L$  и  $L \cdot \cos(\alpha)$ . Тогда суммарную амплитуду в задней точке фокуса объектива можно определить, как:

$$A = e^{-jkL} + e^{-jkL \cos(\alpha)} = e^{-jkL \cos(\alpha)} \left[ e^{-jkL[1-\cos(\alpha)]} + 1 \right] = e^{-jkL \cos(\alpha) - 0.5 jkL[1-\cos(\alpha)]} \times \\ \times \left[ e^{-0.5 jkL[1-\cos(\alpha)]} + e^{0.5 jkL[1-\cos(\alpha)]} \right] = 2e^{-0.5 jkL[1+\cos(\alpha)]} \cdot \cos\{0.5kL \cdot [1-\cos(\alpha)]\},$$

где  $k=2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны источника излучения.

Отсюда интенсивность в точке заднего фокуса объектива будет равна:

$$I = A \cdot A^* = 4 \cdot \cos^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} L \cdot (1 - \cos \alpha) \right]. \quad (3)$$

Приравняв (3) к нулю и единице, получим выражения, описывающие величины углов, при которых интенсивность принимает минимальное и максимальное значения, соответственно:

$$\alpha_{k \max} = \arccos \left\{ 1 - \frac{\lambda}{\pi \cdot L} \cdot \pi k \right\}; \quad \alpha_{k \min} = \arccos \left\{ 1 - \frac{\lambda}{\pi \cdot L} \cdot \left( \frac{\pi}{2} + \pi k \right) \right\},$$

где  $k$  – целое число, номер максимального (минимального) колебания интенсивности (рис. 5).

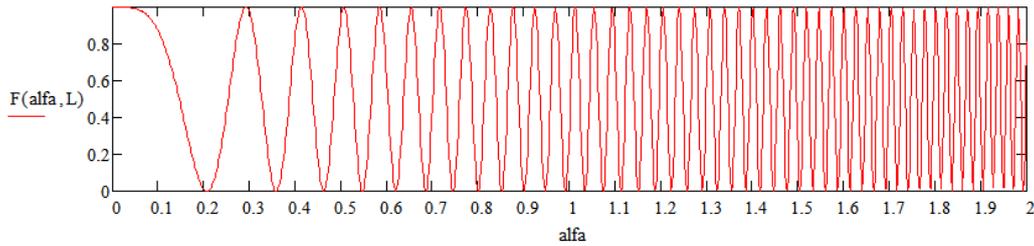


Рис. 5. Зависимость интенсивности в задней фокальной точке объектива от угла падения излучения на систему, град. ( $L = 50$  мм,  $\lambda = 0,65$  мкм)

Минимально разрешаемую угловую величину можно определить по формуле:

$$d\alpha = \frac{\alpha_{k \max} - \alpha_{k \min}}{2 \cdot m}, \text{ сек}, \quad (4)$$

где параметр  $m = 100$  – величина разрешающей способности приемника по интенсивности ( $dI = 0,01 \times I_{\max}$ ); коэффициент, равный двум, учитывает двукратное увеличение разрешающей способности при использовании данной схемы в качестве автоколлиматора. Это следует из известного правила геометрической оптики: при повороте плоского зеркала на некоторый угол  $\alpha$ , луч, падающий на апертуры, развернется на удвоенный угол  $2\alpha$ .

С помощью среды Mathcad были рассчитаны величины  $d\alpha$  при различных начальных углах падения излучения на схему и различных расстояниях между апертурами  $S$  (рис. 6).

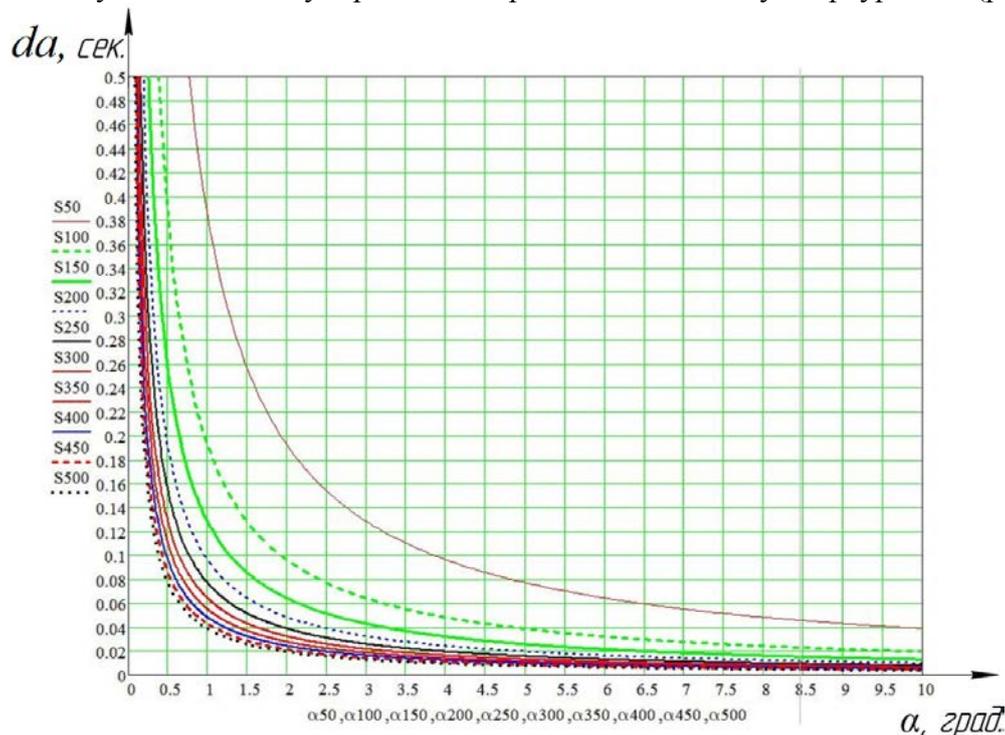


Рис. 6. Зависимость минимально разрешимого угла  $d\alpha$  от расстояния между щелями  $S$  (мм) и начального угла падения излучения  $\alpha$  ( $\lambda = 0,65$  мкм)

Из графиков видно, что чувствительность системы к изменению угла падения излучения  $\alpha$  растет при увеличении расстояния между апертурами  $S$  и начальным значением  $\alpha$ . Это открывает возможность варьирования чувствительности схемы путем изменения параметров  $S$  и  $\alpha$ .

Для оценки максимальной чувствительности схемы зададимся ее параметрами, исходя из возможности изготовления. Параметры, ограничивающие максимальную чувствительность:

- максимальный диаметр коллимированного пучка излучения;
- длина когерентности источника излучения;
- минимальный размер щелевых апертур или нитей.

Максимальный диаметр пучка на рис. 4. можно определить по выражению:

$$D_{\max} = S \cdot \sin(\alpha), \text{ мм} \quad (5)$$

Максимальные диаметры пучков излучения определяются используемым типом лазерного источника, а также системами коллимирования и расширения пучка. Параметры наиболее распространенных и доступных лазерных источников приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Параметры источников излучения

Вид источника излучения	Диаметр выходного пучка, мм	Длина когерентности, мм
Полупроводниковые лазеры и лазерные диоды	Зависит от фокусирующей оптики и угла расходимости пучка	2–5; > 1 000, одночастотный режим
Твердотельные лазеры с диодной накачкой	$\leq 2$	> 50 000, одночастотный режим
Гелий-неоновые лазеры	$\leq 0,8$	200–300

Минимально необходимую длину когерентности источника излучения можно определить по формуле (2).

С помощью формул (2) и (5) в среде Mathcad также были рассчитаны необходимые длина когерентности  $l_{\text{ког.}}(S, \alpha)$  и диаметр коллимированного пучка излучения  $D_{\max}(S, \alpha)$ . Данные о параметрах  $l_{\text{ког.}}$ , мм. и  $D_{\max}$ , мм при одной и той же чувствительности схем были сведены в Табл. 2. Они показывают, что главным схемным параметром, определяющим чувствительность системы, является максимальный диаметр пучка излучения источника, что ограничивает использование твердотельных и гелий-неоновых лазеров, имеющих узкий диаметр пучка.

При использовании в качестве источника лазерного диода – задача по созданию широкого коллимированного пучка существенно упрощается. В этом случае диаметр пучка определяется углом расходимости излучения лазерного диода и фокусным расстоянием объектива. Максимальный угол расходимости типичных лазерных диодов в двух взаимоперпендикулярных плоскостях составляет порядка  $9^\circ$  и  $30^\circ$ . Таким образом, для достижения ширины пучка  $D_{\max} = 34$  мм (при чувствительности в 0,01") потребуется объектив с минимальным фокусным расстоянием  $f' = \frac{D_{\max}}{2 \cdot \text{tg}(15^\circ)} \approx 64$  мм.

Вторым важным параметром схемы, ограничивающим максимальную чувствительность, является длина когерентности излучения источника. Как видно из Табл. 1 этому требованию удовлетворяют современные лазерные диоды.

Третий фактор – минимально возможные размеры щелевых апертур или нитей. Обратимся к рис. 7 и формуле (6), описывающей интенсивность излучения в дальней зоне при дифракции на одной щели:

$$I(\beta) = \text{sin}^2 \left( \frac{a \cdot \pi}{\lambda} \beta \right), \quad (6)$$

где  $\text{sin} c(x) = \text{sin}(x) / x$ ;  $a$  – ширина щели,  $\beta$  – угол дифракции.

Таблица 2

Конструктивные параметры схем с различной чувствительностью

		S, мм						
		50	100	150	200	250	300	
$d\alpha^*$	0,5"	$\alpha$	45'	23'	16'	10,6'	9,5'	8,6'
		$l_{\text{ког.}}$	0,004	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001

	<b><i>Dmax</i></b>	0,65	0,67	0,69	0,62	0,69	0,75
0,1"	<b><i>α</i></b>	3,8°	1,9°	1,3°	1°	46'	38'
	<b><i>Iкоз.</i></b>	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
	<b><i>Dmax</i></b>	3,36	3,35	3,35	3,36	3,35	3,33
0,05"	<b><i>α</i></b>	7,7°	3,9°	2,6°	1,9°	1,5°	1,3°
	<b><i>Iкоз.</i></b>	0,45	0,23	0,15	0,11	0,09	0,08
	<b><i>Dmax</i></b>	6,70	6,71	6,72	6,72	6,68	6,71
0,02"	<b><i>α</i></b>	19,6°	9,7°	6,4°	4,8°	3,8°	3,2°
	<b><i>Iкоз.</i></b>	2,89	1,42	0,94	0,7	0,56	0,47
	<b><i>Dmax</i></b>	16,76	16,77	16,74	16,75	16,76	16,77
0,015"	<b><i>α</i></b>	26,6°	12,9°	8,6°	6,4°	5,1°	4,3°
	<b><i>Iкоз.</i></b>	5,27	2,53	1,68	1,25	1	0,83
	<b><i>Dmax</i></b>	22,35	22,35	22,36	22,35	22,33	22,34
0,01"	<b><i>α</i></b>	42,1°	19,6°	12,9°	9,7°	7,7°	6,4°
	<b><i>Iкоз.</i></b>	12,90	5,78	3,79	2,83	2,26	1,88
	<b><i>Dmax</i></b>	33,51	33,52	33,52	33,54	33,52	33,52

\* при разрешающей способности приемника равной 1 % от максимального значения интенсивности.

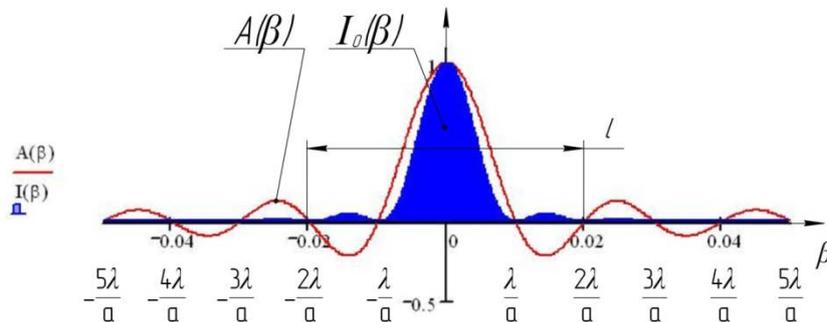


Рис. 7. Зависимость амплитуды  $A(\beta)$  и интенсивности  $I_0(\beta)$  от угла дифракции в дальней зоне от щели шириной  $a$  (масштаб по вертикальной оси не сохранен)

Из этого рисунка и выражения (6) следует, что положение первого дифракционного минимума определяется величиной  $\beta = \lambda/a$ . При изменении угла падения излучения на щель дифракционная картина смещается на приемнике (при этом центр наиболее широкой области интерференционной картины остается неподвижным).

Величина максимального угла падения излучения, при котором в задней фокальной точке объектива будет располагаться первый минимум дифракционной картины, равна

$$\alpha_{\max} = \lambda/a, \quad (7)$$

где  $a$  – ширина апертуры, мкм.

Возможны следующие способы регистрации интерференционной картины:

– В пределах половины главного максимума дифракционной картины.

Известно, что явление дифракции света на объекте можно наблюдать при размере объекта  $a$ , сравнимым с длиной волны падающего излучения, поэтому примем минимальный размер щелевых апертур равным  $a = 10$  мкм ( $\lambda = 0,65$  мкм). В этом случае угол падения излучения, при котором в точке заднего фокуса объектива окажется край главного максимума дифракционной картины, будет равен  $\alpha_{\max} = 0,65/10 = 0,065$  рад или  $\alpha_{\max} = 3,7^\circ$ . На рис. 6 видно,

что максимальная чувствительность схемы при данном угле падения излучения будет около  $0,1''$  (при расстоянии между апертурами  $S = 50$  мм).

Достоинством данного способа регистрации является большая интенсивность главного максимума дифракционной картины по сравнению с побочными.

Недостатки: необходимость изготовления узких щелей ( $\sim 10$  мкм); меньшая достижимая чувствительность схемы при малых  $S$  (из-за малого начального угла падения излучения  $\alpha$  на апертуры).

– В побочном максимуме дифракционной картины.

Преимуществом такого способа является возможность достижения большей чувствительности без необходимости создания узких апертур, поскольку для данного угла падения излучения, всегда можно выбрать необходимый размер апертур так, чтобы в задней фокальной точке объектива находился центр побочного максимума. Возможна регулировка чувствительности схемы изменением начального угла  $\alpha$  таким образом, чтобы в точке заднего фокуса объектива оказался другой побочный максимум дифракционной картины.

Недостатки: меньший диапазон относительных измерений, ограниченный полушириной побочного максимума дифракционной картины; меньшая интенсивность побочных максимумов.

– Регистрация интерференционной картины, накладывающейся на большое число побочных максимумов дифракционной картины. Достоинствами данного способа являются: наименьшие требования к размерам апертур (до нескольких миллиметров); возможность достижения большей чувствительности, чем при работе в главном максимуме дифракционной картины; диапазон измерений не ограничен размерами дифракционных максимумов; возможна более плавная регулировка чувствительности схемы путем изменения начального угла падения излучения.

Недостатки: большая сложность обработки интерференционной картины и поиска значения интенсивности в случае попадания дифракционного минимума в область измерения интенсивности интерференционной полосы.

### Оценка потенциальной чувствительности схемы к продольным перемещениям

Оценку чувствительности схемы дифракционного интерферометра к продольным перемещениям апертуры можно провести на основании формулы (2) и рис. 4. При фиксированном угле падения излучения на систему  $\alpha$  и изменении расстояния  $S$  между апертурами изменяется разность фаз между пучками излучения, освещающими апертуры, что приводит к изменению интенсивности в наблюдаемой интерференционной картине.

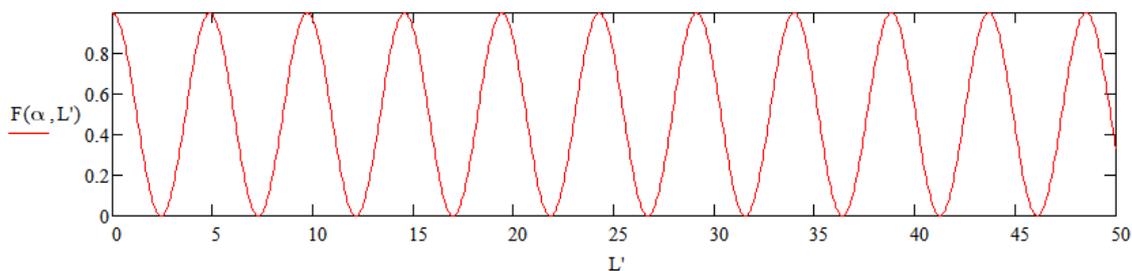


Рис. 8. Колебания интенсивности в фокальной плоскости линзы при продольном перемещении апертуры, мкм ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $\lambda = 0,65$  мкм)

На рис. 8 представлена зависимость интенсивности в задней фокальной точке объектива от величины продольного смещения щелевой апертуры  $L$ , построенная по формуле (3). Из графика видно, что чувствительность системы не меняется при изменении расстояния между апертурами и определяется только начальным углом падения излучения  $\alpha$ .

Результаты расчетов, выполненных с помощью (3) и выражения аналогичного (4), представлены в Табл. 3. Из представленных данных видно, что максимальная чувствительность схемы к продольным перемещениям может достигать единиц нанометров.

Таблица 3

Минимально разрешимые продольные смещения апертуры

$\alpha^0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
$dL^*$ , нм	21300	5300	2400	1300	860	600	440	330	260	210	95	54	35
$\alpha^0$	30	35	40	45	50	55	60						
$dL^*$ , нм	24	18	14	11	9,1	7,6	6,5						

\* при разрешающей способности приемника равной 1 % от максимального значения интенсивности.

### Оценка потенциальной чувствительности схемы к поперечным перемещениям одной из апертур

Оценим потенциальную чувствительность схемы дифракционного интерферометра при поперечных смещениях апертуры. При этом будем рассчитывать величину поперечного смещения апертуры, при котором интенсивность в задней фокальной точке объектива изменится на минимальную величину, разрешаемую приемником.

Как показано на рис. 9 в случае поперечного смещения  $v$  одной из апертур между освещающими апертуры пучками будет возникать добавочная разность фаз  $\Delta$ , величину которой можно определить по выражению:  $\Delta(\alpha) = v \cdot \sin(\alpha)$ .

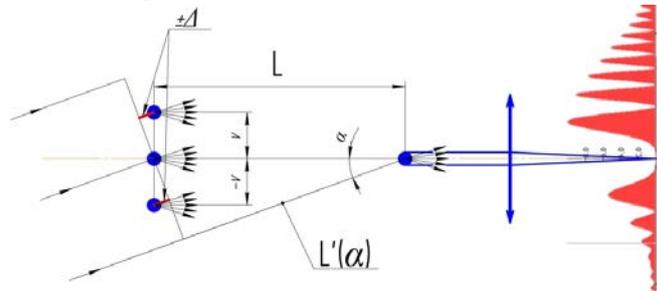


Рис. 9. Схема образования разности фаз между апертурами при их поперечных смещениях

Заменим щелевые апертуры точечными источниками излучения, при этом положим, что оптические пути, которые проходят волны перед интерференцией в задней фокальной точке объектива от каждого из источников будут равны  $L+v \cdot \sin(\alpha)$  и  $L \cdot \cos(\alpha)$ . Тогда суммарную амплитуду в задней точке фокуса объектива можно определить, как:

$$\begin{aligned}
 A &= e^{-jk(L+v \cdot \sin \alpha)} + e^{-jkL \cos \alpha} = e^{-jkL \cos \alpha} \left( e^{-jk[L(1-\cos \alpha)+v \cdot \sin \alpha]} + 1 \right) = \\
 &= e^{-jkL \cos \alpha - 0.5jk[L(1-\cos \alpha)+v \cdot \sin \alpha]} \cdot \left( e^{-0.5jk[L(1-\cos \alpha)+v \cdot \sin \alpha]} + e^{0.5jk[L(1-\cos \alpha)+v \cdot \sin \alpha]} \right) =, \\
 &= 2e^{-0.5jkL(1+\cos \alpha) - 0.5jkv \sin \alpha} \cdot \cos\{0.5k \cdot [L(1-\cos \alpha) + v \cdot \sin \alpha]\}
 \end{aligned}$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны источника излучения.

Отсюда интенсивность в заднем фокусе объектива будет равна:

$$I = A \cdot A^* = 4 \cdot \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} [L(1-\cos \alpha) + v \cdot \sin \alpha] \right\}. \quad (8)$$

Расчеты показали, что чувствительность системы к поперечным смещениям постоянна при любых продольных расстояниях  $L$  между апертурами и определяется углом падения излучения  $\alpha$ . Также было выявлено отсутствие влияния величины поперечного смещения щелей на чувствительность схемы к продольным перемещениям.

В ходе дальнейших более детальных исследований было выявлено, что использование упрощенного выражения (8), показывает в два раза меньшую чувствительность схемы, чем наблюдается в экспериментах. Аналогичную, вдвое заниженную чувствительность, показала первоначальная дифракционная модель, не учитывающая описанную в данном разделе добавочную разность фаз  $\Delta$ . В связи с этим, оценка чувствительности схемы к поперечным смещениям проводилась с помощью модифицированной дифракционной модели, дополненной фазовыми множителями, полученными из геометрических соображений

(рис. 4, 9; выражения 2, 3, 8). Полученные с помощью выражений (4) и (11) минимально разрешимые поперечные смещения одной из апертур при различных углах падения излучения представлены в Табл. 4.

Таблица 4

Минимально разрешимые поперечные смещения апертуры

$\alpha^\circ$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
$dv^*$ , нм	93	47	31	23	19	16	13	12	10	9,4	6,3	4,8	3,8
$\alpha^\circ$	30	35	40	45	50	55	60						
$dv^*$ , нм	3,5	2,9	2,5	2,3	2,1	2,0	1,9						

\* при разрешающей способности приемника равной 1 % от максимального значения интенсивности.

Как следует из Табл. 3 и 4, при малых углах падения излучения ( $\alpha < 2^\circ$ ) схема может быть использована для контроля поперечных смещений апертуры. В этом случае направляющая, по которой перемещается щель, ориентируется поперек оптической оси линзы. Смещение апертуры поперек направляющей на величину порядка 5 мкм не вызовет существенной погрешности измерений. При более высокой разрешающей способности схемы колебания апертуры поперек направляющей делают невозможным проведение измерений. Принципиально решить данную проблему можно установкой направляющей под углом  $\gamma = \arctg(dv/dL)$  к оптической оси объектива. В этом случае интерференционная картина оказывается нечувствительной к поперечным смещениям апертуры относительно направляющей, поскольку при этом она перемещается и вдоль, и перпендикулярно оптической оси линзы на величины, вызывающие одинаковые приращения интенсивности в интерференционной картине, но противоположные по знаку. Минимально регистрируемое перемещение апертуры вдоль направляющей в этом случае составит  $dvL = (dL^2/4 + dv^2/4)^{1/2}$ .

Другой путь повышения чувствительности схемы к поперечным перемещениям апертуры – установка призмы БР-180 между дифракционными элементами и их размещение на единой подложке перед призмой. В этом случае за счет одновременного смещения обеих апертур чувствительность к поперечным смещениям увеличивается вдвое (рис. 17б).

### Расчет дифракционной картины от двух щелевых апертур, расположенных перед объективом и освещаемых наклонным пучком излучения

Пусть щелевая апертура имеет функцию пропускания

$$T(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{при } -a/2 \leq \xi \leq a/2; \\ 0 & \text{при } \xi < -a/2; \xi > a/2 \end{cases}$$

и освещается плоской волной с амплитудой  $A$  (рис. 10).

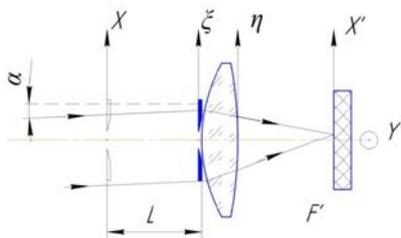


Рис. 10. К выводу формулы распределения амплитуды поля в фокальной плоскости объектива от одной апертуры

В случае если апертура расположена вплотную к линзе, амплитуда волны, падающая на линзу, будет равна  $U(\xi) = A \cdot T(\xi)$ . Поле за линзой может быть определено, как поле перед линзой, умноженное на коэффициент передачи линзы в приближении Френеля:

$$U(\eta) = U(\xi) \cdot T_{\text{линзы}},$$

где  $T_{\text{линзы}} = e^{jkn \Delta_0} \cdot e^{-j \frac{k\xi^2}{2f}}$ ;  $e^{jkn \Delta_0}$  – постоянный фазовый множитель, учитывающий прохождение света в линзе с показателем преломления  $n$  и толщиной  $\Delta_0$ .

Поле в задней фокальной плоскости линзы может быть найдено с помощью

$$\text{приближения Френеля: } U(x') = \frac{j}{\lambda z} e^{jkz} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\eta) \cdot e^{j \frac{k(x'-\eta)^2}{z}} d\eta,$$

где  $z = f$  – путь, пройденный излучением из плоскости  $\xi_3$  в плоскость  $\xi_4$ . Таким образом, получим:

$$U(x') = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\xi) \cdot e^{-j \frac{k\xi^2}{2f}} \cdot e^{j \frac{k(x'-\xi)^2}{f}} d\xi = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\xi) \cdot e^{-j \frac{k\xi^2}{2f}} \cdot e^{j \frac{kx'^2}{2f}} \cdot e^{j \frac{k\xi^2}{2f}} \cdot e^{-j \frac{kx'\xi}{f}} d\xi$$

$$U(x') = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} \cdot e^{j \frac{kx'^2}{2f}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\xi) \cdot e^{-j \frac{kx'\xi}{f}} d\xi = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} \cdot e^{j \frac{kx'^2}{2f}} F\{U(\xi)\}. \quad (9)$$

Выражение (9) без учета фазовых множителей представляет собой прямое преобразование Фурье и является спектральной функцией поля за щелевой апертурой  $F\{U(\xi)\}$ .

Известно, что спектральная функция поля, прошедшего участок свободного пространства длиной  $L$ , может быть определена, как спектральная функция поля до прохождения пути  $L$ , умноженная на передаточную функцию свободного пространства  $K(L)$ :

$$F\{U(\xi)\} = F\{U(x)\} \cdot K(L),$$

$$\text{где } K(L) = e^{jkL} e^{-j \frac{L}{2k} x^2} = e^{jkL} e^{-j \frac{L}{2k} \left(\frac{kx'}{f}\right)^2}.$$

Таким образом, если щелевая апертура расположена на расстоянии  $L$  перед линзой, то амплитуду поля в ее фокальной плоскости можно определить, как:

$$U(x') = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} \cdot e^{j \frac{kx'^2}{2f}} \cdot F\{U(x)\} \cdot K(L) = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} e^{jkL} \cdot e^{j \frac{kx'^2}{2f} \left(1 - \frac{L}{f}\right)} \cdot F\{U(x)\}$$

или

$$U(x') = \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} e^{jkL} \cdot e^{j \frac{kx'^2}{2f} \left(1 - \frac{L}{f}\right)} \int_{-\infty}^{+\infty} U(x) \cdot e^{-j \frac{kx'}{f} x} dx. \quad (10)$$

При наклонном падении излучения в соответствии с теоремой смещения для преобразования Фурье, в выражение (10) вводятся дополнительные фазовые множители вида  $e^{jkx \cdot \sin \alpha}$  и  $e^{jky \cdot \sin \beta}$ .

В случае если перед линзой установлены две щелевые апертуры, как видно на рис. 4 и 9, то между волновыми фронтами, исходящими из апертур возникает дополнительная разность фаз. Она может быть учтена с помощью фазовых множителей вида  $e^{jkL(2-\cos \alpha - \cos \beta)}$  и  $e^{jk(v_x \sin \alpha + v_y \sin \beta)}$ . Они описывают разность фаз, возникающую между вершиной первой поверхности объектива и центром щелевой апертуры.

Двумерное распределение амплитуды в фокальной плоскости объектива от одной апертуры может быть найдено по выражению:

$$U(x', y') = A \frac{j}{\lambda f} e^{jkf} e^{jkL(2-\cos \alpha - \cos \beta)} \cdot e^{j \frac{k(x'^2 + y'^2)}{2f} \left(1 - \frac{L}{f}\right)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(x, y) \cdot e^{-jkx \left(\frac{x'}{f} \sin \alpha\right)} e^{-jky \left(\frac{y'}{f} \sin \beta\right)} dx dy,$$

$$\text{где } T(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } -a/2 + v_x \leq x \leq a/2 + v_x; \quad -b/2 + v_y \leq y \leq b/2 + v_y \\ 0 & \text{при } x < -a/2 + v_x; \quad x > a/2 + v_x; \quad y < -b/2 + v_y; \quad y > b/2 + v_y \end{cases},$$

$a$  и  $b$  – размеры апертур,  $v_x$  и  $v_y$  – смещения апертур от оси системы.

Суммарную интенсивность поля в фокальной плоскости линзы при дифракции на двух апертурах получим, как  $I(x', y') = U_{\Sigma}(x', y') \cdot U_{\Sigma}^*(x', y')$ :

$$I(x', y') = \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \left[ \left\{ a_1 b_1 \cdot \sin c \left[ \frac{\pi a_1}{\lambda} \left( \frac{x'}{f} - \sin \alpha \right) \right] \cdot \sin c \left[ \frac{\pi b_1}{\lambda} \left( \frac{y'}{f} - \sin \beta \right) \right] \right\}^2 + \left\{ a_2 b_2 \cdot \sin c \left[ \frac{\pi a_2}{\lambda} \left( \frac{x'}{f} - \sin \alpha \right) \right] \cdot \sin c \left[ \frac{\pi b_2}{\lambda} \left( \frac{y'}{f} - \sin \beta \right) \right] \right\}^2 + \right. \\ \left. + 2 a_1 a_2 b_1 b_2 \cdot \sin c \left[ \frac{\pi a_1}{\lambda} \left( \frac{x'}{f} - \sin \alpha \right) \right] \cdot \sin c \left[ \frac{\pi a_2}{\lambda} \left( \frac{x'}{f} - \sin \alpha \right) \right] \cdot \sin c \left[ \frac{\pi b_1}{\lambda} \left( \frac{y'}{f} - \sin \beta \right) \right] \cdot \sin c \left[ \frac{\pi b_2}{\lambda} \left( \frac{y'}{f} - \sin \beta \right) \right] \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{\lambda} \cdot \left[ \frac{x'^2 + y'^2}{f^2} \cdot (L_1 - L_2) + 2(L_1 - L_2) \cdot (\cos \alpha + \cos \beta - 2) + 2 \left( \frac{x'}{f} - 2 \sin \alpha \right) \cdot (v_{x1} - v_{x2}) + 2 \left( \frac{y'}{f} - 2 \sin \beta \right) \cdot (v_{y1} - v_{y2}) \right] \right] \right\} \right]. \quad (11)$$

### Экспериментальная проверка теоретических положений работы

Для проверки правильности математических моделей на базе лабораторий НИУ ИТМО кафедры КиПОП [7] и Технического университета (ТУ) Ильменау (Германия) были собраны лабораторные установки.

Проверка соответствия экспериментальных результатов – теоретическим включала:

– сравнение экспериментальных и рассчитанных по выражению (11) интерференционных картин при различных расстояниях между апертурами вдоль оптической оси линзы;

– сравнение экспериментального и расчетного изменений интенсивности в центре интерференционной картины при изменении угла падения излучения на схему;

– сравнение экспериментального и расчетного изменений интенсивности в фиксированной точке на приемнике при поперечном смещении одной из апертур.

Принципиальная схема и фотография установки для контроля влияния угла падения излучения на интерференционную картину представлена на рис. 11. Установка состоит из двух щелевых апертур 7 и 8, расположенных на оптической оси линзы, одна из которых закреплена над центром вращения поворотного столика 4. Для исключения взаимного экранирования щелей они были разнесены в плоскости, перпендикулярной рисунку. Сведение дифрагировавших на щелях волновых фронтов осуществлялось линзой 9 ( $f = 310$  мм). Остаточная расходимость лазерного пучка ( $\lambda = 0,65$  мкм) после расширителя 5 не превышала 5'.

С помощью автоколлиматора 1 с чувствительностью 0,1" контролировался угол поворота столика  $\alpha$ , при этом угол падения излучения на апертуры изменялся на величину  $2\alpha$ , полученная дифракционная картина регистрировалась на монохромную ПЗС-матрицу UK1158-M (размер пикселя 6,45×6,45 мкм; разрешение 1360×1024 пикселей).

В ходе экспериментов были получены несколько серий фотографий дифракционных картин при различных расстояниях между апертурами  $S$  и углах падения излучения  $\alpha$ . С помощью среды Mathcad из полученных фотографий были считаны данные об интенсивности и построены графики зависимости интенсивности в центре дифракционной картины от угла падения излучения.

В Табл. 5 представлены примеры полученных фотографий, инвертированные по интенсивности, для указанных значений  $\alpha$  ( $L_1 = 442$  мм,  $L_2 = 324$  мм,  $v_{x1} = v_{x2} = 0$ ).

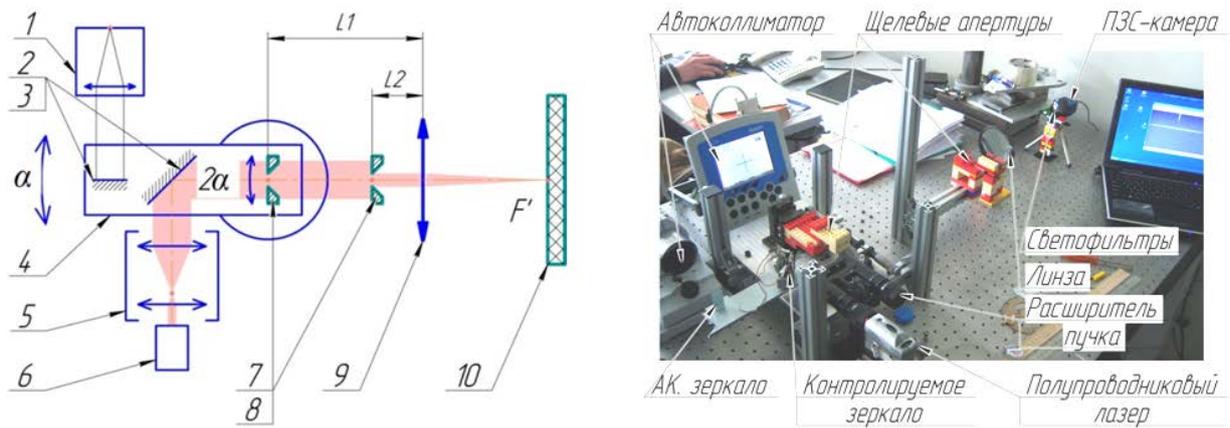


Рис. 11. Установка для проверки чувствительности схемы к углу падения излучения: 1 – автоколлиматор Elcomat 3000; 2, 3 – зеркала; 4 – поворотный столик с микрометрической подвижкой; 5 – телескопическая система Кеплера,  $\Gamma_m = 12^{\times}$ ; 6 – полупроводниковый лазер; 7, 8 – щелевые апертуры; 9 – линза; 10 – ПЗС-матрица

Таблица 5

Интерференционная картина, расположенная в главном максимуме дифракционной картины при различных углах падения излучения

$\alpha$	162.6"	
	278.5"	
	390.6"	
	450.1"	
	516.6"	
	576.3"	
	611.3"	
	675.4"	

На рис. 12 представлены теоретическое и экспериментальное распределения интенсивности на приемнике при нормальном падении излучения на две апертуры, расположенные на оптической оси линзы ( $a_1 = 21$  мкм;  $a_2 = 25$  мкм;  $b_1 = b_2 = 1,5$  мм;  $v_{x1} = v_{x2} = 0$ ;  $v_{y1} = -1$  мм;  $v_{y2} = 1$  мм;  $L_1 = 450,5$  мм;  $L_2 = 38$  мм;  $\alpha = \beta = 0$ ). Яркая вертикальная полоса в центре экспериментальной фотографии – свет, дифрагировавший на остаточном зазоре между экранами с апертурами по оси  $y$ . Видно, что результаты моделирования и эксперимента имеют хорошее качественное соответствие.

На рис. 13 представлены экспериментальные и расчетные графики колебания интенсивности в центре дифракционной картины, полученные при таких же параметрах установки и увеличении угла  $\alpha$  до  $18'$ . Для количественного сравнения полученных результатов определялись положения экстремумов интенсивности. Полученные результаты представлены в Табл. 6.

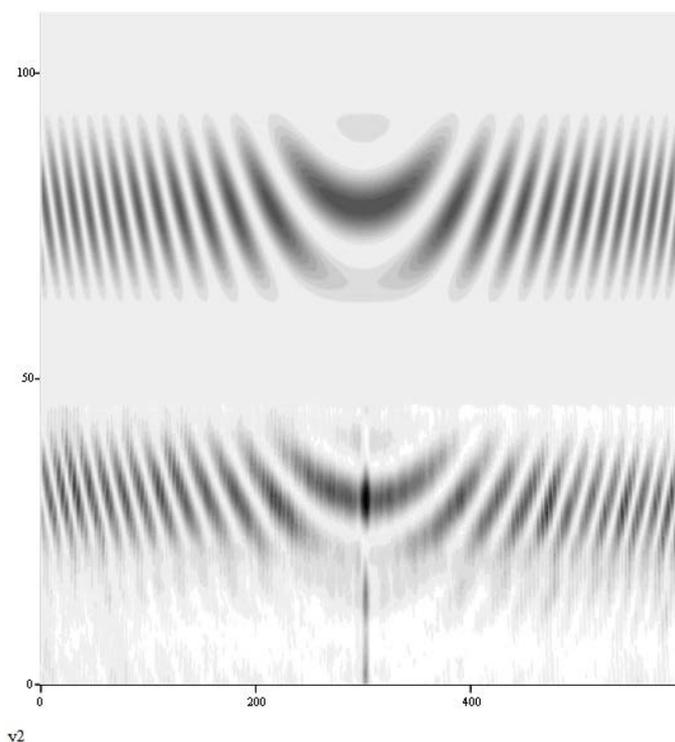


Рис. 12. Теоретическая и экспериментальная интерференционные картины

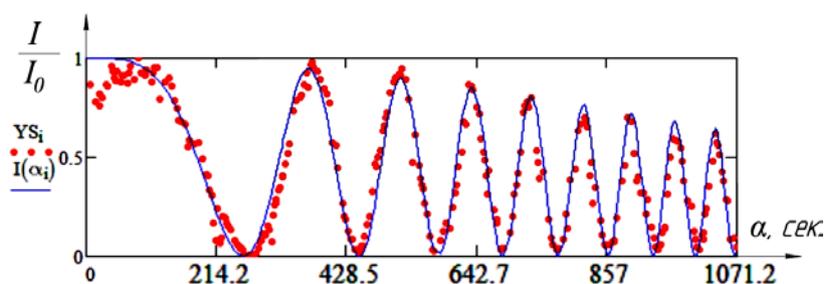


Рис. 13. Графики колебаний интенсивности в центре интерференционной картины, полученные экспериментальным (точечный) и расчетным (непрерывный) путями

Таблица 6

Отклонения положений экстремумов интенсивности от расчетных значений

$\alpha_{\text{Макс}}''$	0	-7,5	-2,8	3,6	-0,5	-1,8	4,3	1,8	-1,3
$\alpha_{\text{Мин}}''$	-6,2	-3,5	6,2	1,1	2,4	5	-9,4	-7,4	-4,8

В Табл. 7 представлены экспериментальные и расчетные значения чувствительностей между соседними экстремумами интенсивности и соответствующие им относительные отклонения чувствительностей схемы от расчетных. Максимальное отклонение чувствительности в эксперименте составило около 35 %.

Полученные смещения положений экстремумов интенсивности объясняются несовершенством установки, отдельные части которой не были жестко закреплены друг относительно друга, а также нестабильностью поворотного столика. Он вносил дополнительное отклонение пучка излучения по вертикали ( $\beta \neq 0$ ), что, в свою очередь, вызывало дополнительный фазовый сдвиг и изменение интенсивности. Влияние изменения угла  $\beta$  может быть легко устранено при обработке интерференционной картины, если вместо одной щелевой апертуры использовать двойную апертуру (подробнее далее), поскольку в этом случае изменение величины  $\beta$  приведет к одинаковому смещению интерференционных полос в обеих интерференционных картинах на приемнике (от каждой пары апертур).

Для проверки правильности работы математической модели (11) при смещении одной из апертур на кафедре КиПОП была собрана установка по схеме, приведенной на рис. 14. Проверка проводилась при малых значениях чувствительности схемы ( $\alpha = 1^\circ$ ;  $\alpha = 30'$ ;  $\alpha = 15''$ ).

Угол падения излучения контролировался по нониусу поворотного столика. В экспериментах использовалась цветная ПЗС-матрица EVS VEI-535, работающая в монохромном режиме (размер пикселя  $2,775 \times 2,775$  мкм; разрешение  $2592 \times 1944$ ) и объектив ( $f = .50$  мм). Поперечное смещение одной из апертур задавалось с помощью винтовой подвижки (шаг винта  $t = .0,5$  мм) и контролировалось с помощью индикатора линейных перемещений, основанного на ПЗС-линейке с чувствительностью 1 мкм (на рисунке не показан). Экспериментальные и расчетные графики интенсивности для случая  $\alpha = .30'$  представлены на рис. 15.

Таблица 7

Теоретическая  $d\alpha_{\text{теор.}}$  и экспериментальная  $d\alpha_{\text{эксп.}}$  разрешающие способности схемы\*

Номер наклонного участка кривой интенсивности	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	10	11	12	13	14	15	16	17	
$d\alpha_{\text{эксп.}}''$	2,64	1,08	0,78	0,69	0,52	0,58	0,53	0,49	0,42
	0,46	0,33	0,39	0,5	0,24	0,43	0,27	0,35	
$d\alpha_{\text{теор.}}''$	2,58	1,07	0,82	0,69	0,61	0,55	0,51	0,47	0,45
	0,42	0,40	0,38	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32	
$\frac{\Delta(d\alpha)}{d\alpha_{\text{теор.}}}, \%$	2,4	1,2	4,9	1	14,7	4,7	4,9	3,4	6,5
	10	17	1,8	37,3	31,8	27,1	18,5	11	

\*при разрешающей способности приемника, равной 1% от максимального значения интенсивности.

Поскольку, как показало моделирование, размеры апертур и величина расстояния  $S$  между ними не оказывают влияния на частоту колебаний интенсивности в любой точке на приемнике излучения, то в данных экспериментах величины параметров  $S$ ,  $a_1$  и  $a_2$  не определялись.

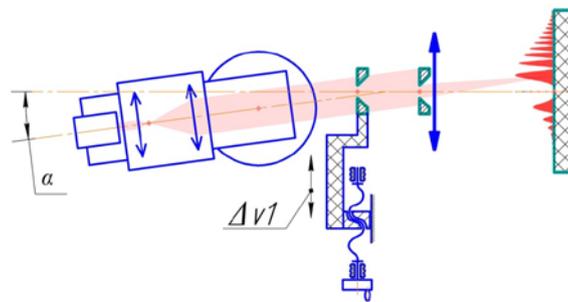


Рис. 14. Установка для проверки чувствительности схемы к поперечному перемещению одной из апертур

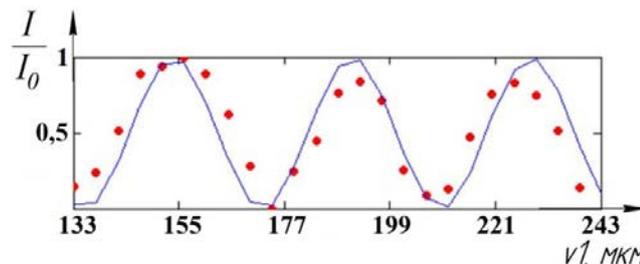


Рис. 15. Графики колебаний интенсивности в точке заднего фокуса объектива, полученные экспериментальным (точечный) и расчетным (непрерывный) путями

Как видно из графиков, периоды колебания интенсивности, полученные в ходе эксперимента, практически совпадают с расчетными. Это подтверждает правильность введения дополнительных фазовых множителей в выражение (10), полученных из геометрических соображений (рис. 4, 9), которые учитывают разность фаз, возникающую между апертурами при наклонном падении излучения. В случае если данные множители не

учитываются, то при тех же параметрах схемы моделирование показывает в два раза меньшую чувствительность (то есть полтора колебания интенсивности для случая на рис. 15). Расчетная разрешающая способность схемы в данном опыте составила  $dv = 180$  нм (при  $dI = 1\%$  от  $I_{max}$ ).

Вывод: проведенные экспериментальные исследования работы схем контроля угловых и линейных перемещений при их низких теоретических чувствительностях показали правильность разработанной математической модели. Это позволяет сделать предположение о верной работе модели при больших значениях чувствительности или при иных способах извлечения информации о контролируемых параметрах из интерференционных картин (например, из величин перемещений интерференционных полос на приемнике в горизонтальном или вертикальном направлениях).

### Перспективы исследуемого Фурье-метода контроля

Полученные выше результаты показали возможность создания дифракционного автоколлиматора, отличающегося большей чувствительностью и меньшими габаритами по сравнению с существующими фотоэлектрическими автоколлиматорами. На рис. 16 представлена возможная схема такого автоколлиматора с разрешающей способностью  $da = 0,05''$ . Для сравнения на том же рисунке приведена фотография фотоэлектрического автоколлиматора Elcomat 3000 ( $da = 0,1''$ ; фокусное расстояние объектива 300 мм). Очевидно, что дифракционный автоколлиматор обладает значительно меньшими габаритными размерами. Его компактность (или чувствительность при тех же габаритах) может быть повышена еще в два раза за счет использования призмы БР-180, помещенной между дифракционными элементами (рис. 17а).

Достоинством предложенной схемы дифракционного автоколлиматора также является возможность регулирования чувствительности и диапазона измерений в зависимости от решаемой задачи. Это может быть выполнено либо смещением одной из апертур вдоль оптической оси объектива (при уменьшении расстояния между апертурами до 10 мм, разрешающая способность схемы составит  $da = 0,25''$ ; а диапазон измерения абсолютных угловых величин  $\Delta\alpha$  увеличится в пять раз); либо поворотом светоделительного кубика (при повороте его по часовой стрелке на  $3,5^\circ$   $da$  составит  $0,56''$ , а  $\Delta\alpha$  увеличивается на порядок).

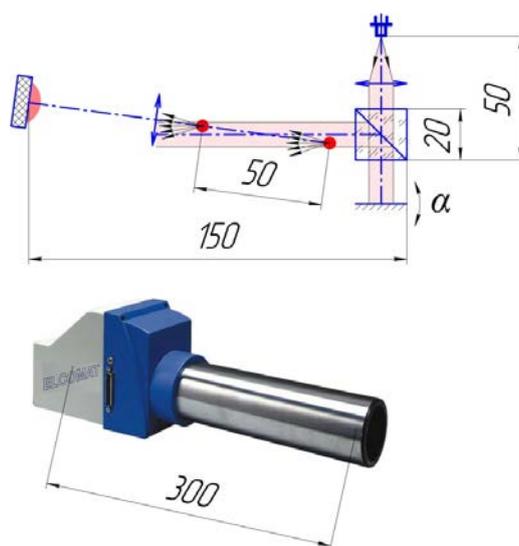


Рис. 16. Дифракционный (сверху) и фотоэлектрический (снизу) автоколлиматоры

Основным недостатком такого дифракционного автоколлиматора на данном этапе исследований является меньший диапазон измерения абсолютных значений угловых величин. Он ограничен периодом синусоидального колебания интенсивности в центре интерференционной картины и в 200 раз больше разрешающей способности. Так, при  $da = 0,1''$  диапазон измерения абсолютных значений составляет  $\Delta\alpha = \pm 10''$ . Для сравнения диапазон измерений у фотоэлектрического автоколлиматора Elcomat 3000 составляет  $\pm 2000''$ .

Этот недостаток может быть устранен заменой одной из апертур двойной. В этом случае на приемнике будут наблюдаться две системы интерференционных полос с разной чувствительностью, одна из которых может выступать в качестве грубой шкалы. Благодаря этому диапазон измерения абсолютных значений угловых величин может быть увеличен в десятки раз.

Дальнейшее увеличение абсолютного диапазона измерений (в несколько раз) возможно с помощью формирования на приемнике рядом с интерференционной картиной дополнительной световой марки по аналогии с традиционными фотоэлектрическими автоколлиматорами. Величина ее смещения может быть использована в качестве третьей, наиболее грубой шкалы отсчетов угловых величин. Это может быть реализовано благодаря размещению наклонной полупрозрачной пластинки в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка (показана пунктиром на рис. 17а).

Полученные результаты показали также возможность использования данного метода для контроля малых линейных перемещений. На рис. 17б представлена возможная схема дифракционного индикатора линейных перемещений. Как видно из рисунка, за счет одновременного смещения двух апертур, закрепленных на одной подложке, расстояние между их проекциями становится равным удвоенной величине смещения, что приводит к двукратному увеличению чувствительности к поперечным перемещениям при тех же углах падения излучения, например, при  $\alpha = 4,5^\circ$ ;  $d\nu = 10$  нм.

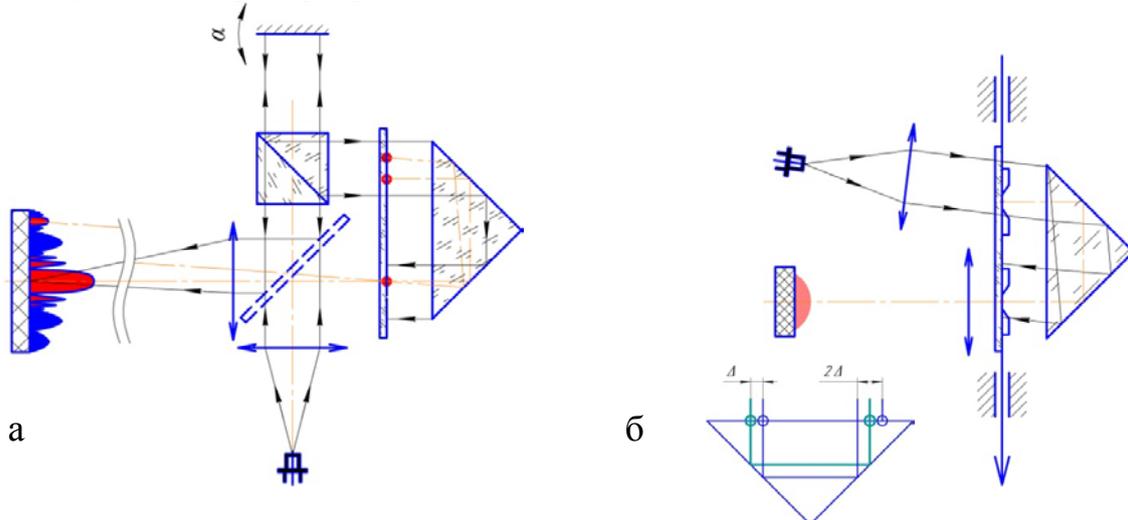


Рис. 17. Компактные схемы: а – дифракционного автоколлиматора; б – индикатора линейных перемещений

В настоящее время ведется разработка макета дифракционного автоколлиматора с расширенным диапазоном измерений абсолютных угловых величин (рис. 18) и программного обеспечения в среде Matlab для обработки интерференционных картин в реальном времени и получения численного значения измеряемой величины угла поворота.



Рис. 18. Макет дифракционного автоколлиматора (без щелевых апертур)

## Заключение

Основные результаты представленной работы:

– проведено теоретическое и экспериментальное исследование новой схемы дифракционного интерферометра. Рассмотрено влияние изменения угла падения излучения и перемещений апертур на интерференционную картину и чувствительность схемы. Получены математические модели, описывающие распределение интенсивности света в плоскости приемника при различных параметрах схемы дифракционного интерферометра;

– получена инженерная методика расчета необходимых конструктивных параметров схемы дифракционного интерферометра: диаметра коллимированного пучка излучения, длины когерентности источника, расстояния между апертурами и начального угла падения излучения, размера щелевых апертур. Проведен их расчет для заданных чувствительностей схемы;

– проведены расчеты чувствительностей схемы к изменению угла падения излучения, продольным и поперечным смещениям апертур при различных ее параметрах и методах регистрации. Максимальные теоретические чувствительности составили 0,01", 35 и 2 нм соответственно;

– для расширения диапазона абсолютных угловых измерений предложено вместо одной из апертур использовать двойную апертуру с целью получения двух интерференционных картин с различной чувствительностью. Этот результат также может быть достигнут при использовании второй схемы освещения с другим углом падения излучения;

– для увеличения чувствительности и компактности схемы дифракционного интерферометра предложено исследовать различные ее модификации (с оптическим клином или с дифракционными решетками);

– на базе кафедр КиПОП НИУ ИТМО и Машиностроения ТУ Ильменау (ФРГ) собраны лабораторные установки измерителей угловых перемещений с выводом экспериментальных интерферограмм на персональный компьютер и их последующей обработкой в среде Mathcad. В настоящее время ведется разработка макета дифракционного автоколлиматора с расширенным диапазоном измерений абсолютных угловых величин, а также программного обеспечения в среде MatLAB для выделения величины угла поворота из интерференционных картин в реальном времени. Первый вариант макета дифракционного автоколлиматора представлен на фотографии (рис. 18).

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что приведенная схема дифракционного интерферометра может быть использована при создании простых и компактных средств измерений угловых и линейных величин, работающих в широком диапазоне чувствительностей (с разрешающей способностью от десятков секунд до 0,01"; от 20 мкм до 2 нм), а также для метрологической аттестации и поверки высокоточных средств измерений.

## Публикации

1. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Исследование схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. Вып. 1 (71). С. 6–9.

2. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Дифракционный метод контроля пространственного положения объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 11. С. 53–56.

3. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Дифракционный метод контроля угловых и линейных перемещений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 78–82.

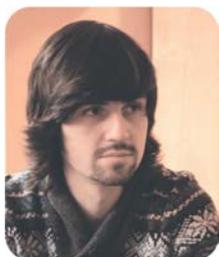
4. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Сб. трудов X Международной конференции «Прикладная оптика-2012» (Санкт-Петербург, 15–19 октября 2012 г.). Т. 1. СПб., 2012. С. 152–156.

5. Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Сб. тезисов докладов II Всероссийского конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 9–12 апреля 2013 г.). Вып. 2. СПб., 2013. С. 54–56.

6. Соколов Ю.А. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Альманах научных работ молодых ученых. Сб. тезисов докладов на XLII научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО (29 января – 1 февраля 2013 г.). СПб., 2013. С. 289–292.
7. Соколов Ю.А., Назаров В.Н. Новый метод дифракционного контроля малых угловых и линейных перемещений // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 12. С. 53–59.
8. Sokolov Y. A., Nazarov V. N. New method of diffraction monitoring of small angular and linear displacements // J. Opt. Technol. 2013. Vol. 80. No. 12. P. 756–760.

### Литература

1. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М., 1987. – 480 с.
2. Проспект фирмы „TRIOPTICS“ (Германия).
3. Проспект фирмы „MOELLER-WEDEL“ (Германия).
4. Назаров В.Н., Линьков А.Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 2. С. 76–81.
5. Arefiev A.A., Ivanov A., Kotenok A. Interferometric devices for angular measurements // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1996. Vol. 2775. P. 189–196.
6. Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К., Черных Д.Ф. Передача и обработка информации голографическими методами. М., 1978. – 304 с.
7. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Дифракционный метод контроля угловых и линейных перемещений // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 4. С. 78–82.



**Черевков Сергей Александрович**  
Факультет фотоники и оптоинформатики  
Кафедра оптической физики и современного естествознания  
E-mail: s.cherevkov@gmail.com

## СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CDHGSE МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

С.А. Черевков

Научный руководитель – профессор А.В. Баранов

### Введение

В последнее время полупроводниковые нанокристаллы или квантовые точки (КТ) находят широкое применение при создании различных типов оптоэлектронных устройств. Это связано с возможностью целенаправленного управления параметрами оптических переходов КТ одного материала путем изменения их размеров. Дополнительные возможности для управления оптическими, электрическими и структурными параметрами КТ появляются при изменении их химического состава, например, при использовании полупроводников тройных соединений типа  $A_xB_{1-x}C$ , где  $0 \leq x \leq 1$  – доля компонента А в составе полупроводника. КТ тройных соединений полупроводников групп  $A^{II}$  и  $B^{VI}$ , обладающие высоким квантовым выходом люминесценции, могут охватывать очень широкий спектральный диапазон излучения от 0,5 до 1,5 мкм, который невозможен для их бинарных аналогов [1–3]. КТ, эффективно люминесцирующие в области 0,8–1,5 мкм, крайне востребованы в различных приложениях инфракрасной (ИК) нанопотоники, включая информационные системы и солнечную энергетику [4]. Среди них КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  имеют большой потенциал для

использования в качестве фоточувствительных элементов и люминофоров в широкой спектральной области благодаря возможности существенного изменения ширины запрещенной зоны как счет размерных эффектов, так и изменением их химического состава.

Для изготовления КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  предложен метод, в котором в исходных эффективно люминесцирующих КТ  $CdSe$  с хорошо контролируемым размером, формой и кристаллической структурой определенная часть атомов  $Cd$  в результате химической реакции замещается на атомы  $Hg$  [4–6], что приводит к сдвигу полосы люминесценции КТ в красную область спектра. В то же время, химический состав и структура получающихся КТ  $CdHgSe$ , а также их связь с люминесцентными параметрами в настоящее время неизвестны, что не позволяет создавать квантовые точки с заданными оптическими свойствами. Ситуация осложняется также тем, что  $CdSe$  может существовать в двух кристаллических структурах: кубической и гексагональной, в то время как  $HgSe$  – только в кубической [7, 8]. В этом случае в результате замещения атомов кадмия атомами ртути может произойти фазовый переход, приводящий к неконтролируемому изменению оптических параметров КТ  $CdHgSe$ . Поэтому проблема установления структурно-химических особенностей полупроводниковых квантовых точек  $CdHgSe$  является в настоящий момент весьма актуальной для развития методов синтеза КТ с улучшенными оптическими параметрами. Ответы на эти вопросы может дать спектроскопия комбинационного рассеяния света, широко используемая для структурно-химического анализа наноразмерных объектов.

Целью настоящего проекта является установление закономерностей формирования химического состава и структуры КТ на основе тройного соединения полупроводников  $CdHgSe$  методом спектроскопии резонансного микро-комбинационного рассеяния света (микро-КР).

Для достижения этой цели предполагается решить следующие задачи:

- получить спектры микро-КР КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  при  $0 \leq x \leq 1$  и провести соотнесение полос в спектре фононным модам материала;
- на основании анализа полученных спектров получить доказательства образования тройного соединения  $Cd_xHg_{1-x}Se$ ;
- установить зависимость частоты фононов от химического состава и кристаллической структуры КТ;
- установить корреляцию между химическим составом КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  и их люминесцентными параметрами.

**Анализ структурно-химических особенностей полупроводниковых квантовых точек  $CdHgSe$  методом резонансного комбинационного рассеяния**

#### **Используемые материалы и методы исследования**

Для выполнения проекта были использованы следующие методы и подходы. Кубические и гексагональные КТ  $CdSe$  3,5 нм в диаметре были синтезированы в соответствии с процедурами высокотемпературного металлоорганического синтеза [7, 8]. Для получения КТ смешанного состава  $CdHgSe$  использовалась контролируемая по времени реакция замещения атомов  $Cd$  в нанокристаллах  $CdSe$ , растворенных в смеси толуол/олеиламин путем добавления раствора бензоата ртути(II) в тетраэтиленгликоле диметилового эфира. Исследовались образцы КТ кубической кристаллической решетки (цинковая обманка) (ZB) и гексагональной кристаллической решетки (вюрцит) (WZ)  $CdSe$ , в которых согласно предложенной методике атомами ртути могло быть замещено 10, 50 и 90 % атомов кадмия, а также КТ полупроводников  $HgSe$  и  $CdSe$ . Для получения спектров поглощения и люминесценции нанокристаллов (НК) использованы спектрофотометр Shimadzu UV3000 и спектрофлуориметр Carry Eclipse. Спектры микро-КР образцов были получены при комнатной температуре с использованием спектрометра микро-КР «InVia Renishaw» при возбуждении излучением 514,5 нм аргонового лазера.

### Спектры поглощения и люминесценции квантовых точек $Cd_xHg_{1-x}Se$ с различным относительным содержанием атомов Hg и Cd

На рис. 1 показаны спектры поглощения и люминесценции ZB CdSe КТ после присоединения 10 и 90 % коллоидных растворов бензоата ртути в толуоле при 30 °С. Реакция с 10 % раствором приводит к небольшому синему смещению первого экситонного максимума в спектрах поглощения, сопровождающемуся увеличением поглощения в красной области. При этом происходит почти полное тушение люминесценции КТ. Оба эти эффекта связаны, по-видимому, с образованием Hg-обогащенной оболочки на поверхности КТ CdSe. Так, объемный HgSe является бесщелевым полупроводником и экситонная рекомбинация происходит в узкозонной Hg-обогащенной оболочке, приводя к его безызлучательной рекомбинации из-за высокой дефектности.

Увеличение концентрации бензоата ртути приводит к сильному красному смещению и спектральному уширению экситонной полосы поглощения, по-видимому, из-за образования  $Cd_xHg_{1-x}Se$ -фазы с узкой запрещенной зоной. При замещении 90 % Cd проявляется люминесценция в ближнем ИК-диапазоне, которая достигает около 25 % сигнала от исходных КТ CdSe. Стоксов сдвиг между положениями максимумов поглощения и люминесценции увеличивается со временем реакции и достигает 0,2 эВ, что в три раза больше, чем для НК ZB CdSe. Такой сдвиг говорит либо о ловушко-подобном характере излучательной рекомбинации, либо об образовании тройного соединения  $Cd_xHg_{1-x}Se$  с Cd-обогащенным центром и Hg-обогащенной оболочкой. Относительно высокая интенсивность люминесценции, возрастающая со временем реакции, говорит об улучшении кристалличности КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  и снижении количества ловушек безызлучательной рекомбинации.

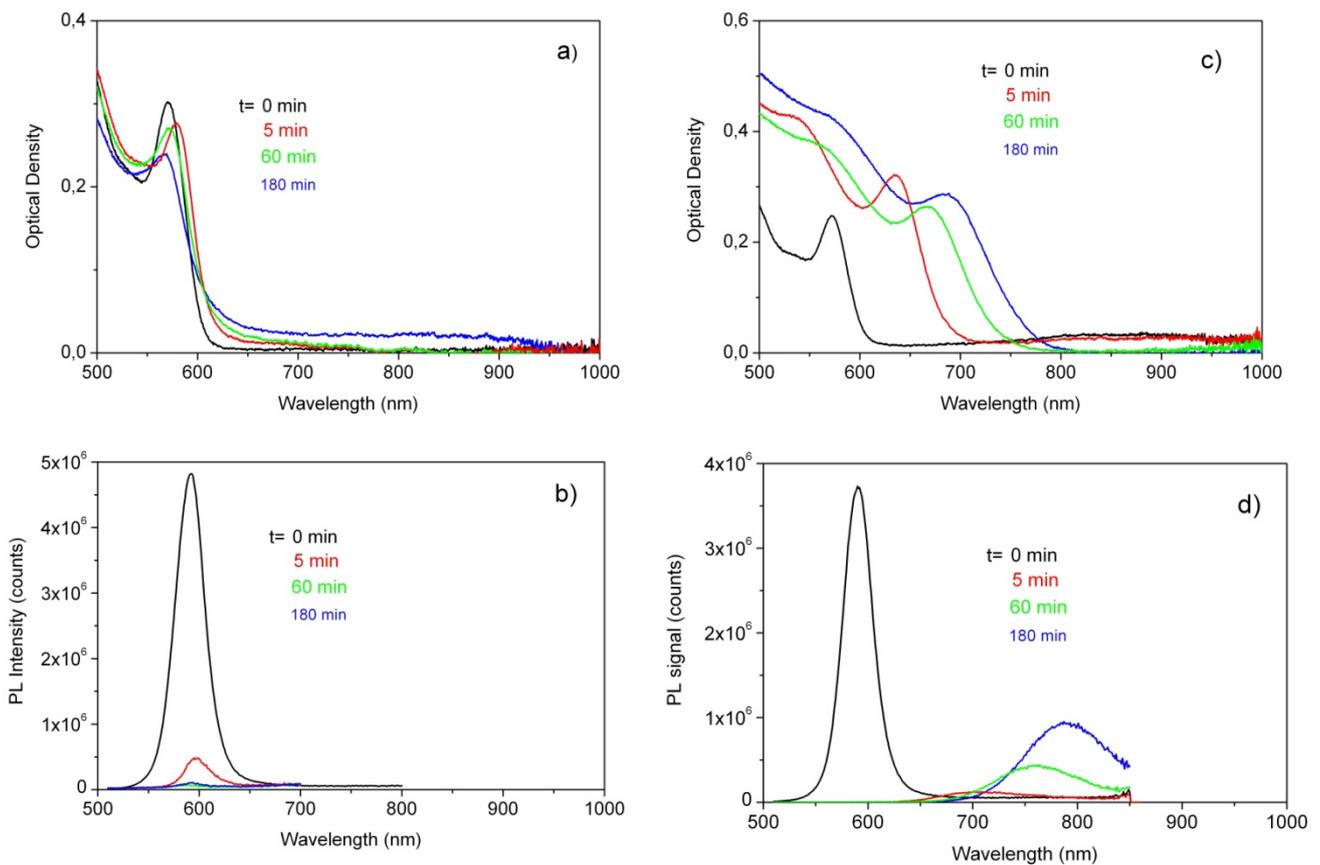


Рис. 1. Спектры: а, с – поглощения; б, д – люминесценции ZB квантовых точек CdSe после замещения Cd: а, в – на 10 %; с, д – на 90 % Hg в динамике.  $\lambda_{ex}^{PL} = 500 \text{ nm}$

Химическое замещение в КТ WZ CdSe показывает отличную от ZB КТ спектральную динамику особенно при высокой концентрации бензоата ртути. Реакция с 10 % раствором бензоата ртути приводит лишь к малому сдвигу экситонных полос поглощения и почти полному тушению люминесценции. Рис. 2 демонстрирует спектры поглощения и люминесценции WZ CdSe КТ после присоединения 90 % коллоидного раствора бензоата

ртути. Величина красного смещения в спектрах поглощения близка по величине к наблюдающейся для ZB КТ, в то время как уширение спектра оказывается значительно большим, что связано, по-видимому, с менее однородной кристаллической структурой нанокристаллов даже при очень длительном времени реакции.

Полосы люминесценции тушатся полностью сразу же после добавления бензоата ртути и показывают незначительный рост с увеличением временем реакции до 180 мин. Это также может быть вызвано высокой дефективностью кристаллической структуры замещенных  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$  НК с доминирующей безызлучательной рекомбинацией возбужденных экситонов. Длительное перемешивание реакционной смеси приводит к появлению интенсивной полосы ИК люминесценции с максимумом около 860 нм и шириной спектральной линии около 160 нм. Величина стоксова сдвига не может быть определена однозначно из-за значительного уширения спектра соответствующих экситонных полос поглощения. Она составляет около 0,2 эВ и близка к значению, полученному для ZB КТ с таким же количеством замещенных атомов кадмия.

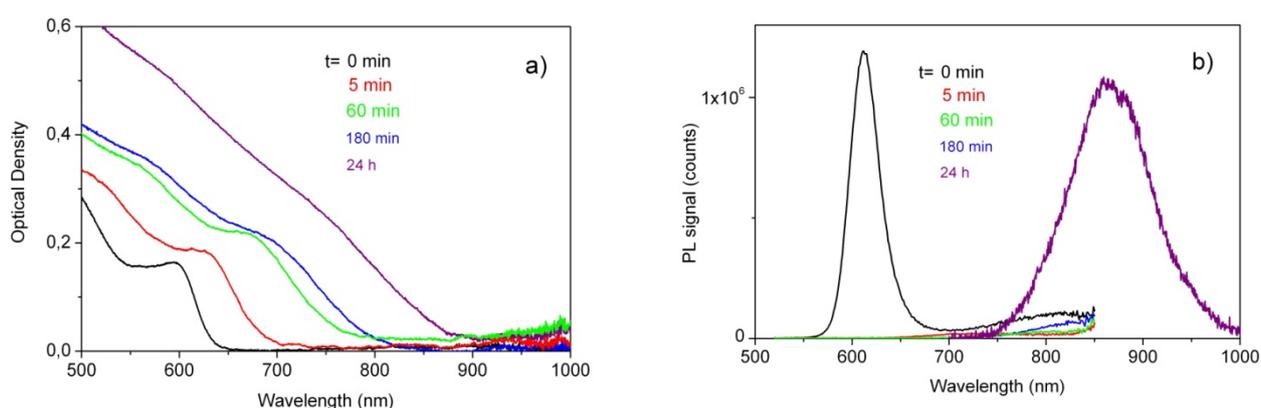


Рис. 2. Спектры: а – поглощения; б – люминесценции WZ квантовых точек CdSe после замещения Cd на 90% Hg в динамике.  $\lambda_{ex}^{PL}=500$  nm

Результаты показывают, что при увеличении времени реакций замещения происходит все увеличивающийся «красный» сдвиг спектров поглощения и люминесценции КТ смешанного состава  $\text{CdHgSe}$ , что качественно соответствует ожидаемым изменениям при замещении в КТ части атомов Cd атомами Hg. Однако, вопрос о реальном образовании тройного кристаллического соединения  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ , все еще остается открытым.

### Спектры микро-КР квантовых точек $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ при $0 \leq x \leq 1$

**Соотнесение полос в спектре фоновым модам материала.** Для того, чтобы установить корреляцию между абсорбционно-люминесцентными параметрами и изменением в кристаллической структуре замещенных КТ, были получены спектры микро-КР КТ  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$  при  $0 \leq x \leq 1$  и проведено соотнесение полос в спектре фоновым модам материала (рис. 3). Значения параметра  $x$  (0; 0,1; 0,5; 0,9 и 1) для исследуемых образцов получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Merlin Zeiss с опцией EDS микроанализа для определения элементного состава.

Анализ полученных спектров КР ZB квантовых точек CdSe позволил сделать следующие выводы.

1. Исходные ZB CdSe КТ показывают спектры КР, характерные для CdSe. Известно, что по спектрам КР нельзя различить КТ CdSe кубической и гексагональной структуры. Наблюдаются полосы поверхностного (SO), продольного (LO) и 2LO фононов на 186, 207,5 и 409  $\text{см}^{-1}$  соответственно. Поперечных (TO) фононов нет, так как имеет место резонансное КР. Частоты полос, их полуширины и отношение интенсивностей 2LO/LO соответствуют известным данным.

2. Представленный для сравнения образец КТ HgSe показывает полосы TO-, LO- и 2LO-фононов с частотами 135, 175 и 346  $\text{см}^{-1}$  соответственно, практически совпадающими с частотами объемного HgSe [9] (135, 173 и 345  $\text{см}^{-1}$ ). TO-полоса видна, потому что

возбуждение нерезонансное, то есть частота возбуждающего излучения далека от фундаментального перехода НК. Ширина линий необычно большая ( $> 40 \text{ см}^{-1}$ ), что свидетельствует о наличии неупорядоченностей в кристаллической решетке КТ HgSe.

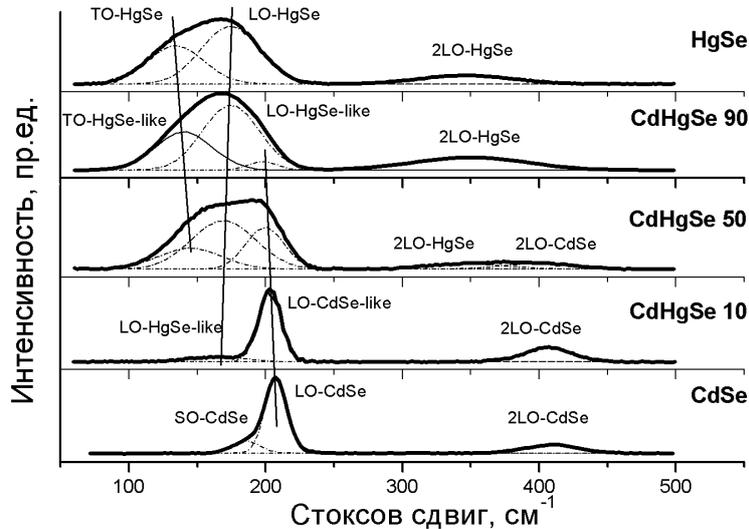


Рис. 3. Набор спектров КР от КТ кубической структуры: CdSe, HgSe и CdHgSe разного состава. Указано разложение на отдельные полосы гауссовыми функциями. Показано отнесение полос фоновым модам материалов

3. Для КТ с минимальным содержанием ртути (10 %) в низкочастотной области наблюдается слабая полоса  $164 \text{ см}^{-1}$  с шириной  $41 \text{ см}^{-1}$ . Отнести ее к ТО-фонону CdSe ( $165 \text{ см}^{-1}$  в объеме) нельзя, поскольку резонансные условия те же, что и в чистом CdSe. Поверхностной модой CdSe она не может быть, поскольку ее частота слишком мала. Единственно возможное отнесение - LO-HgSe-like мода CdHgSe. Полосы  $204 \text{ см}^{-1}$  и  $406,6 \text{ см}^{-1}$  соответствуют LO- и 2LO- модам CdSe. Важно, что частота LO-моды (и 2LO тоже) меньше, чем у CdSe точек. Это согласуется с ожидаемым поведением LO-CdSe-like полосы для смешанного двухмодового кристалла CdHgSe. С другой стороны, ширина этой полосы такая же, как и у CdSe точек, что свидетельствует об образовании на поверхности CdSe КТ тонкого слоя смешанного кристалла.

4. При увеличении содержания Hg до 50 % в спектре наблюдаются пять полос:  $145$ ;  $169$ ;  $199,5$ ;  $336$  и  $398 \text{ см}^{-1}$ , которые относятся к TO-HgSe-like, LO-HgSe-like, LO-CdSe-like, 2LO-HgSe-like и 2LO-CdSe-like модам CdHgSe. При переходе от образца с содержанием ртути 10 % к образцу с содержанием 50 % наблюдаются сдвиги полос ТО- и LO-фононов HgSe и CdSe, ожидаемые для двухмодовых смешанных кристаллов CdHgSe. Это свидетельствует о внедрении атомов ртути в кристаллическую структуру CdSe. Ширина полос LO-HgSe-like и LO-CdSe-like увеличилась, что свидетельствует об отсутствии порядка в структуре смешанного кристалла.

5. В КТ ZB CdSe с содержанием Hg 90 % в спектре видны полосы с частотами  $140$ ,  $174$ ,  $198$  и  $348 \text{ см}^{-1}$ . Сдвиги ТО- и LO- полос HgSe идут в ожидаемом для двухмодовых смешанных кристаллов CdHgSe направлении, а интенсивность полосы LO-CdSe-like моды резко уменьшается, что соответствует уменьшению содержания Cd.

**Доказательства образования тройного соединения  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ .** На рис. 4 продемонстрирована зависимость частоты фононов от химического состава и кристаллической структуры КТ.

Видно, что замещение 10, 50 и 90 % атомов Cd на атомы Hg приводит к монотонному уменьшению частоты полосы CdSe-подобного LO-фонона и увеличению частоты полосы HgSe-подобного LO-фонона [10]. При этом наблюдается уменьшение интенсивности полосы CdSe-подобного LO-фонона и увеличение интенсивности полосы HgSe-подобного LO-фонона. Такая модификация спектров КР полностью соответствует ожидаемой для двухмодового смешанного кристалла и свидетельствует об образовании кристаллического тройного соединения  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ .

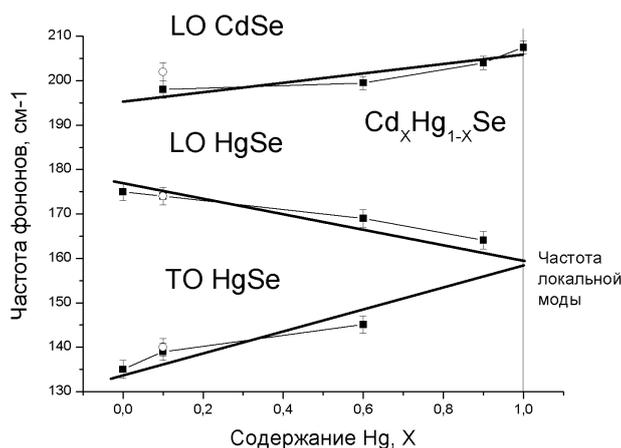


Рис. 4. Зависимость частоты фононов в спектре КР разного состава от содержания Hg для ZB CdSe. Пустые точки соответствуют положению полос в спектре КР образца W CdSe 90 %

**Сопоставление спектров КР образцов квантовых точек с кубической и гексагональной типами решеток.** На рис. 5 показано сравнение спектров образцов WZ CdSe и ZB CdSe, в которых ртутью было замещено 90 % кадмия.

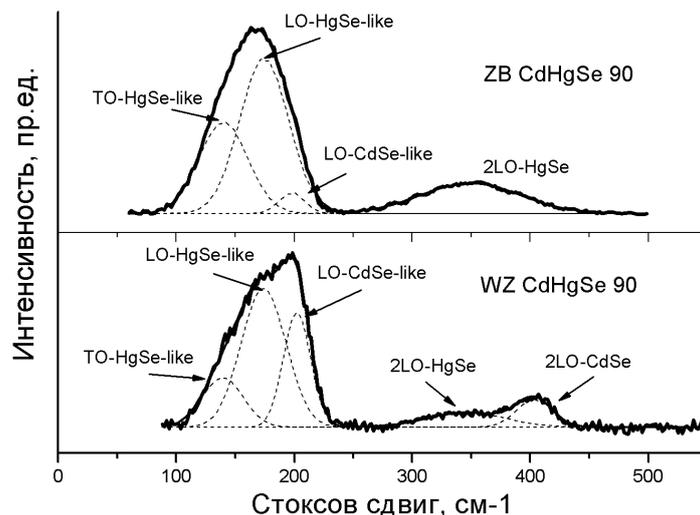


Рис. 5. Сравнение спектров КР КТ CdHgSe 90 %, полученных от гексагональных (вюрцит, W) и кубических (цинковая обманка, ZB) КТ CdSe. Показано разложение на отдельные полосы гауссовыми функциями и отнесение полос фононам материалов

В квантовых точках WZ CdSe, с 90 % Hg, в спектре видны пять полос с частотами 139, 174, 202, 345 и 403  $\text{см}^{-1}$ . Сдвиги TO- и LO-полос HgSe идут в ожидаемом для двухмодовых смешанных кристаллов CdHgSe направлении, хотя и не так сильно (рис. 5), однако LO-CdSe-like полоса неожиданно сдвигается в область высоких частот на 2,5  $\text{см}^{-1}$  (до 202  $\text{см}^{-1}$ ) и становится уже, чем для ZB CdHgSe с 50 % Hg. Сужаются полосы TO-HgSe-like и LO-HgSe-like фононов, а также обертона 2LO-HgSe-like и 2LO-CdSe-like, что очевидно, поскольку стали спектрально разрешенными полосы обертонов. Совсем слабо уменьшается относительная интенсивность полосы LO-CdSe-like. Замещение Cd ртутью в нем идет с трудом, несмотря на большое количество ртути. А сужение полос говорит об относительно более упорядоченной структуре, чем в случае ZB CdSe. Возможно, что образец гетерогенный и в нем сосуществуют более или менее упорядоченные области, одна из которых обогащена Cd, а другая Hg.

**Корреляция между химическим составом квантовых точек  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$  и их люминесцентными параметрами**

В результате анализа спектров КР исследуемых образцов был установлен реальный химический состав синтезируемых КТ и показана кристалличность их структуры. Это

позволяет сделать окончательные выводы о наличии корреляции между химическим составом КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  и их люминесцентными параметрами, приведенными выше. Установлено, что предлагаемый метод химического замещения в КТ CdSe части атомов кадмия атомами ртути, действительно может быть использован для получения КТ тройного состава  $Cd_xHg_{1-x}Se$  с полосами люминесценции в ближней ИК-области спектра. Это возможно как при кубической, так и гексагональной решетках исходных CdSe КТ. При этом увеличение относительного содержания Hg в КТ приводит ко все более сильному сдвигу их полос поглощения и люминесценции в длинноволновую область спектра.

### Заключение

Показано, что спектроскопия КР позволяет установить факт контролируемого замещения атомов Cd атомами Hg в КТ CdSe с образованием тройного соединения  $Cd_xHg_{1-x}Se$ . Продемонстрировано, что химическое превращение бинарных CdSe КТ в тройные  $Cd_xHg_{1-x}Se$  с помощью катионного замещения в коллоидном растворе зависит от морфологии и кристаллической фазы начальных КТ CdSe. Кубические CdSe КТ могут быть относительно легко преобразованы в изоструктурные  $Cd_xHg_{1-x}Se$  точки, излучающие в ближней ИК-области. Гексагональные CdSe КТ требуют увеличения времени замещения, необходимого для преобразования гексагональной кристаллической фазы CdSe в кубическую.

Полученные результаты являются новыми. Они могут быть использованы в создании квантоворазмерных структур с заданными оптическими, электрическими и другими свойствами. Структуры на основе КТ  $Cd_xHg_{1-x}Se$  востребованы для создания устройств ближнего ИК-диапазона таких, как лазеры, светодиоды, фоточувствительные элементы и люминофоры. Они применимы в различных приложениях ИК-нанопотоники, включая информационные системы и солнечную энергетику, а также в качестве биологических маркеров и фотосенсибилизаторов фотодинамической терапии, поскольку их спектры люминесценции находятся в области прозрачности биологических тканей.

### Публикации

1. Черевков С.А., Ушакова Е.В., Богданов К.В. Спектроскопия комбинационного рассеяния нанокристаллов полупроводников  $Cd_xHg_{1-x}Se$  // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Т. 2. Санкт-Петербург, 2011. С. 332–333.
2. Cherevkov S.A., Baranov A.V., Ushakova E.V., Litvin A.P., Fedorov A.V., Prudnikau A.V., Artemyev M.V. Analysis of structural and chemical features of CdHgSe nanocrystals via resonance Raman spectroscopy // SPIE Photonics Europe 2014. Photonics, Optics, Lasers, Micro- and Nanotechnologies (Brussels, Belgium, 14–17 April 2014).
3. Черевков С.А., Ушакова Е.В., Богданов К.В., Баранов А.В., Артемьев М.В. Анализ структурно-химических особенностей полупроводниковых квантовых нанокристаллов CdHgSe методом комбинационного рассеяния света // Сб. трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб., 2011. С. 79–81.
4. Prudnikau A. et al. Chemical substitution of Cd ions by Hg in CdSe nanorods and nanodots: Spectroscopic and structural examination // Materials Science and Engineering B. 2012. Vol. 177. No 10. P. 744–749.

### Литература

1. Zhong X., Han M., Dong Z. et al. Composition-tunable  $Zn_xCd_{1-x}Se$  nanocrystals with high luminescence and stability // Journal of the American Chemical Society. 2003. Vol. 125. No 28. P. 8589–8594.
2. Bailey R.E., Nie S. Alloyed semiconductor quantum dots: Tuning the optical properties without changing the particle size // Journal of the American Chemical Society. 2003. Vol. 125. No 23. P. 7100–7106.
3. Zhong X., Feng Y., Knoll W., Han M. Alloyed  $Zn_xCd_{1-x}S$  nanocrystals with highly narrow luminescence spectral width // Journal of the American Chemical Society. 2003. Vol. 125. No 44. P. 13559–13563.

4. Rogach A.L., Euchmüller A., Hickey S.G., Kershaw S.V. Infrared-Emitting Colloidal Nanocrystals: Synthesis, Assembly, Spectroscopy, and Applications // *Small*. 2007. Vol. 3. P. 536–557.
5. Liu F.-C., Chen Y.-M., Lin J.-H., Tseng W.-L. Synthesis of highly fluorescent glutathione-capped Zn<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Se quantum dot and its application for sensing copper ion // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009. Vol. 337. P. 414–419.
6. Qian H., Dong C., Peng J. et al. High-quality and water-soluble near-infrared photoluminescent CdHgTe / CdS quantum dots prepared by adjusting size and composition // *Journal of Physical Chemistry C*. 2007. Vol. 111. P. 16852–16857.
7. Shen H., Wang H., Tang Z. et al. High quality synthesis of monodisperse zinc-blende CdSe and CdSe/ZnS nanocrystals with a phosphine-free method // *CrystEngComm*. 2009. Vol. 11(8). P. 1733–1738.
8. Peng Z., Peng X. Nearly monodisperse and shape-controlled CdSe nanocrystals via alternative routes: nucleation and growth // *Journal of the American Chemical Society*. 2002. Vol. 124 (13). P. 3343–3353.
9. Kumazaki K. Resonant Raman Scattering near E<sub>1</sub>+Δ<sub>1</sub> in Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Se // *Physica Status Solidi (b)*. 1989. Vol. 161. P. 353–362.
10. Черевков С.А., Ушакова Е.В., Богданов К.В. Спектроскопия комбинационного рассеяния нанокристаллов полупроводников Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Se // Сб. тезисов докладов конференции молодых ученых. Т. 2. Санкт-Петербург, 2011. С. 332–333.



**Чичина Татьяна Викторовна**  
**Факультет пищевых технологий (ИХиБТ)**  
**Кафедра технологии мясных, рыбных продуктов и консервирования**  
**холодом**  
**E-mail: t.chichina@gmail.com**

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОЛИЗА ОТРАБОТАННЫХ ПИВНЫХ ДРОЖЖЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТА С НАПЕРЕД ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Т.В. Чичина

Научный руководитель – профессор В.Е. Куцакова

### **Цели и задачи:**

Проект посвящен разработке технологии переработки отработанных пивных дрожжей (ОПД) с целью использования их белковых ингредиентов для пищевых и кормовых нужд.

Для отыскания комплексного технологического решения проблемы необходимо решить следующие задачи:

- разработать технологию удаления горечи в отработанных пивных дрожжах;
- разработать технологию, связанную с повышением перевариваемости пивных дрожжей;
- инактивировать нуклеиновые кислоты;
- разработать технологию удаления оболочки с поверхности дрожжевой клетки;
- разработать технологию автолизированных дрожжей с максимальными сорбционными свойствами;
- исследовать свойства полученного белкового ингредиента, как сорбента микотоксинов;
- рекомендовать оборудование для получения сухого продукта, подобрать режимы для сушки пивных дрожжей при высоком термическом коэффициенте полезного действия применительно к конкретному продукту.

Таким образом, следует получить сухой продукт, который можно использовать для пищевых и кормовых нужд.

### Методы исследования

Дрожжи пивные сухие представляют собой однородный сыпучий, гранулированный или чешуйчатый порошок от светло-бежевого до темно-коричневого цвета. Он имеет специфический запах и горький вкус.

Однако дрожжи являются уникальным продуктом, содержащим витамины, микроэлементы, глутатион – регулятор процессов окисления и восстановления, а также белок [1, 2], в котором содержатся пять из шести основных аминокислот, расходуемых организмом на пластические нужды (аргинин, гистидин, лизин, триптофан и тирозин). Дрожжи обладают высокой энергетической ценностью. Например, один килограмм сухих дрожжей поставляет в организм 18984 кДж. Они более богаты белком, чем мясо. Аминокислотный состав, а также содержание витаминов и микроэлементов, содержащихся в сухих дрожжах, представлены в Табл. 1 и 2.

Таблица 1

Витаминный и микроэлементный состав сухих пивных дрожжей

<b>Витамины</b>	<b>мг/кг</b>
В <sub>1</sub> (тиамин)	8,2
В <sub>2</sub> (рибофлавин)	120,4
В <sub>3</sub> (пантотеновая кислота)	110,5
В <sub>4</sub> (холин)	4250,0
В <sub>5</sub> (никотиновая кислота)	370,7
В <sub>6</sub> (свободный пиридоксин)	15,4
Н (биотин истинный)	0,75
В <sub>с</sub> (фолиевая кислота)	14,2
В <sub>12</sub> (кобаламин)	0,44
Инозин	1720,0
<b>Микроэлементы</b>	<b>мкг/кг</b>
Железо	1570,0
Цинк	210,1
Марганец	75,2
Медь	8,4

Таблица 2

Аминокислотный состав сухих пивных дрожжей

<b>Аминокислоты</b>	<b>мг/кг</b>
Лизин	2,18
Гистидин	0,90
Аргинин	1,82
Аспарагиновая кислота	2,99
Треонин	1,54
Серин	1,65
Глутаминовая кислота	5,07
Пролин	1,47
Глицин	1,41
Аланин	2,27
Цистин	0,32
Валин	1,95
Метионин	0,55
Изолейцин	1,49
Лейцин	2,26

Аминокислоты	мг/кг
Тирозин	1,09
Фенилаланин	1,39
Кальций	0,19
Фосфор	1,07

В России практически отсутствуют способы промышленной переработки побочных продуктов пивоварения. Это представляет серьезную проблему для пивоваренных заводов, которым необходимо утилизировать отработанные дрожжи. В то же время в странах Европы дрожжи широко используются, как белковый компонент в комбикормах, а также в качестве добавок в соусы, пасты, лекарственные препараты.

Разрабатываемая технология состоит из следующих операций.

На первом этапе путем многократной промывки отработанных пивных дрожжей (ОПД) удаляются остатки молодого пива. Для этого дрожжи предварительно разбавляют водой в соотношении 1:1. После перемешивания их обрабатывают на центрифуге в течение 10 мин. при скорости 3000 об/мин. Уменьшение числа оборотов приводит к существенному увеличению времени обработки, а увеличение – к частичному нарушению структуры дрожжей. Густую фракцию вновь разбавляют водой в соотношении 1:1. Если исходная горечь в дрожжах составляет 85,7 BU, то операция предварительной промывки уменьшает ее на 10–15 %.

Далее следует обработка полученной фракции щелочью NaOH при pH 11, после чего суспензию нагревают. На рис. 1 представлена зависимость единиц горечи в жидкой фазе от температуры процесса. Наилучшей выбрана температура в 60 °С, так как дальнейшее ее повышение приводит к резкому изменению цвета продукта (от светлого до темно-коричневого), а уменьшение – к увеличению горечи.

При нагревании изо-альфа-кислоты, взаимодействуя с гидроксидом Na<sup>+</sup>, образуют соли и переходят в растворимое состояние. Изменение продолжительности данного процесса при перемешивании суспензии со скоростью 60 об/мин в пределах 5–30 мин. незначительно влияет на величину удаляемой горечи. Наилучшим признано время – 10 мин., так как за этот период NaOH равномерно распределяется по продукту, а изо-альфа-кислоты успевают прореагировать с ним. На рис. 2 представлен график зависимости горечи в жидкой фазе от pH среды. Процесс проходит при температуре 60 °С. Из анализа полученной зависимости видно, что с увеличением pH среды увеличивается содержание горечи в жидкой фазе и соответственно уменьшается в дрожжах.

Полученные обезгорченные дрожжи обладают темным цветом, что крайне нежелательно. Одним из методов предотвращения их потемнения является внесение в продукт поверхностно активных веществ, роль которых исполняет растительное масло, содержащее непредельные жирные кислоты. Внесение его в количестве одного процента от объема дрожжей приводит к изменению цвета продукта от темно-коричневого до светло-кремового. При этом горечь продукта уменьшается на 3–4 %.

На третьем этапе продукт разбавляется в соотношении 1:3 и обрабатывается на центрифуге в течение 10 мин. при скорости 3000 об/мин. После промывки его pH уменьшается до 9, а после нейтрализации содержание соли не превышает 1 %, что допустимо нормативами.

Итак, с помощью промывки можно удалить горечь из продукта, однако перевариваемость его увеличится незначительно.

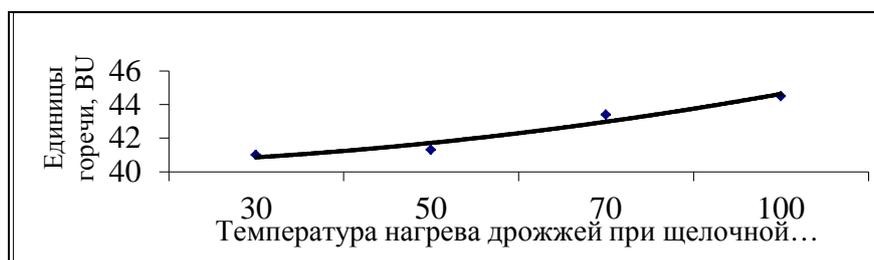


Рис. 1. Зависимость горечи в жидкой фазе суспензии от температуры

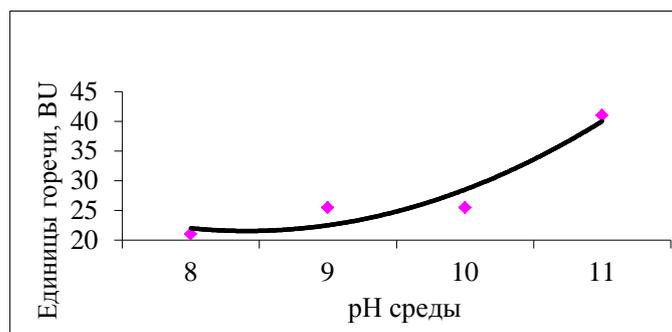


Рис. 2. Зависимость горечи в жидкой фазе суспензии от pH среды

### Исследование содержания нуклеиновых кислот в продукте, полученном из отработанных пивных дрожжей

Важнейшим аспектом, препятствующим использованию ОПД, является содержание в них большого количества нуклеиновых кислот. После щелочной обработки продукта образуются соли нуклеиновых кислот, которые выходят из него при последующей промывке.

Исследование содержания нуклеиновых кислот (высокомолекулярных) после отмытки низкомолекулярных компонентов проводили по методу, описанному в [3]. Результаты измерений представлены в Табл. 3.

Таблица 3

Содержание нуклеиновых кислот

Показатель / Образец	1	2
Содержание РНК, % вес	0,10± 0,01	0,74± 0,05

Продукт, полученный нами из пивных дрожжей, (образец 1) содержит следовые количества РНК, а содержание ДНК в нем менее 0,1 %.

Заключение фирмы ООО «АМТ», протокол №1126 по образцу 2, полученному на производстве: содержание рибонуклейновой кислоты (РНК) в образце характерно для промышленных сухих кормовых дрожжей, подвергнутых плазмолизу перед сушкой. Обычные производственные условия плазмолиза дрожжей близки к оптимальным для распада нуклеиновых кислот (60–70 °С), когда происходит деградация молекулярной структуры этих полимеров до нуклеотидов и далее нуклеозидов и нуклеиновых оснований с выбросом последних через повреждения клеточной оболочки. Такое снижение содержания нуклеиновых кислот увеличивает кормовую ценность получаемого продукта за счет уменьшения риска накопления мочевой кислоты, образующейся в организме животного из пуринов в составе РНК и ДНК.

На следующем этапе происходит снятие оболочки дрожжевой клетки с помощью гомогенизации. Сущность предлагаемого нами метода заключается в том, что деструкция прочной оболочки клетки ОПД осуществляется посредством прохождения суспензии в аппарате с перепадом давлений в 200–220 атм. Такое существенное воздействие взрывает оболочку клетки и ее белковое содержимое, включающее в достаточном количестве аргинин, триптофан, тирозин и в несколько меньшем количестве цистеин, оказывается доступным для воздействия ферментов пищеварительного тракта животных, птиц и человека. Это в свою очередь увеличивает переваримость ОПД с 45–55 % до 80–83 %. При этом использование давления ниже 200 атм не позволяет полностью разорвать клеточные оболочки, а давление выше 220 атм технически трудно достижимо на стандартных гомогенизаторах.

На предложенный оригинальный способ удаления оболочки получено разрешение для выдачи патента.

### Исследование свойств перевариваемого протеина в продукте, полученном из ОПД

Экспериментально установлено, что в исходных пивных дрожжах процент перевариваемого протеина составляет около 45–55 %. При проведении только щелочной

обработки (без гомогенизации) процент его повышается до 65–70 % в зависимости от кислотности раствора и продолжительности процесса. Гомогенизация продукта повышает процент перевариваемого протеина до 92 %.

Последующие стерилизация (деактивации) продукта при температуре 90–100 °С и нейтрализация его соляной кислотой до рН 7 снижают горечь готового продукта с 85,7 до 0 BU [2]. Измерение горечи проводилось по методу *European Brewery Convention (EBC, 1987)*.

Далее следует сушка обезгорченных дрожжей. Сухой порошкообразный продукт удобен для последующего хранения, транспортировки и применения. Нами был проведен подбор оборудования для сушки. Остановились на сушильном агрегате типа «СМАНПС» со встречно-закрученными струями инертного носителя, который выполнен из фторопласта в виде кубика с длиной ребра 6-7 мм. Температура теплоносителя (нагретого воздуха) на входе в агрегат колеблется в пределах 180–200 °С, конечное влагосодержание продукта составляет от 5 до 7 %. Перед подачей на сушку продукт обезвоживался в центрифугах со скоростью 3000об/мин., что увеличивало содержание сухого компонента до 25–30 %.

На рис. 3 представлен алгоритм, который учитывает все моменты исследования.

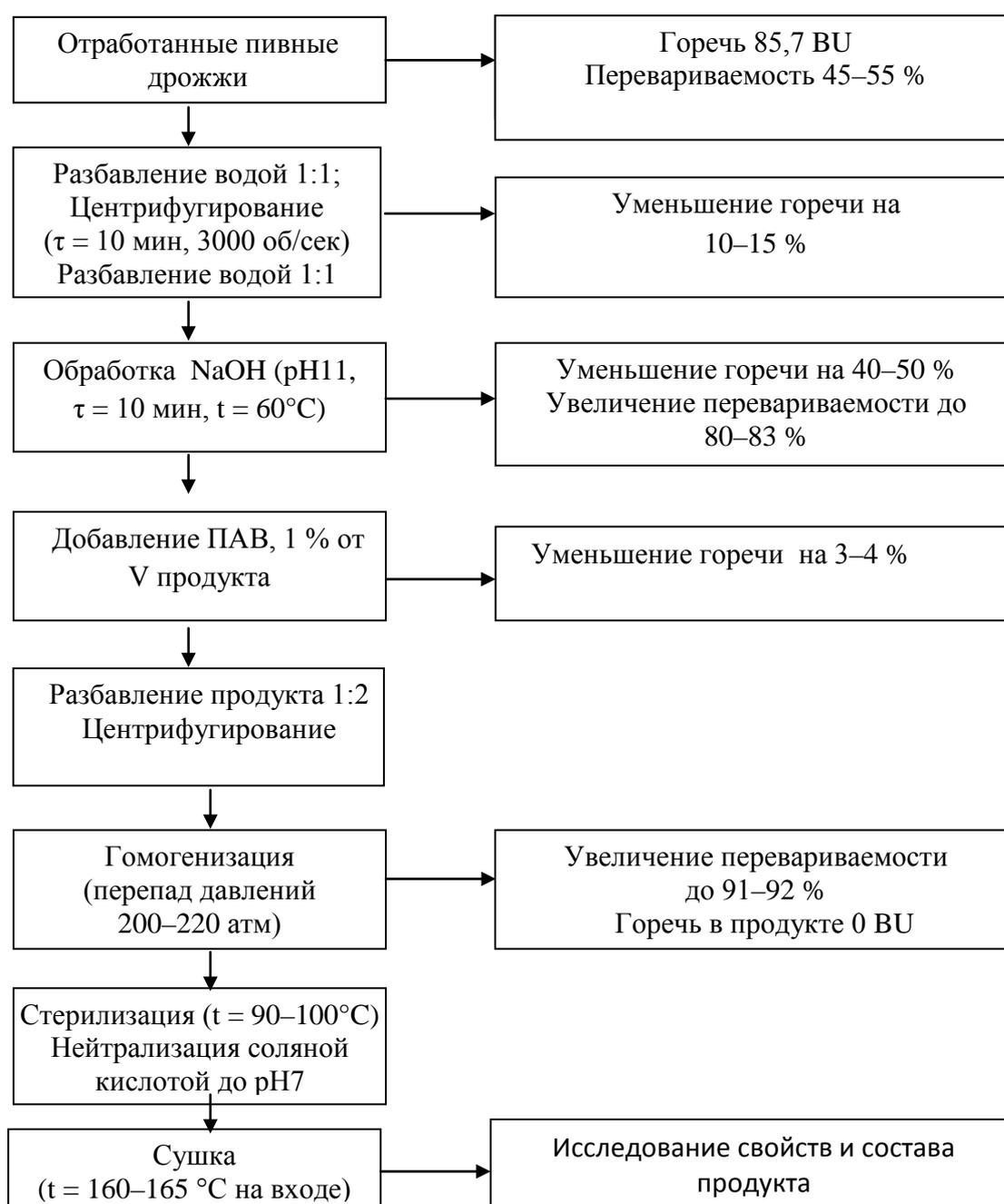


Рис. 3. Технология переработки ОПД

### **Сорбционная способность оболочки дрожжевой клетки ОПД**

Установлено, что в процессе переработки ОПД, на поверхности дрожжевой клетки образуется плотная полисахаридная оболочка, которая является сорбентом микотоксинов. В мировой практике существует ряд сорбентов, однако они значительно дороже, ведь наш получен из побочных продуктов пищевого производства.

В настоящее время проблема иммунодепрессивного эффекта микотоксинов вызывает особый интерес. Микотоксины – это токсичные продукты жизнедеятельности микроскопических (плесневых) грибов. Они являются природными загрязнителями зерна злаковых, бобовых, семян подсолнечника, а также овощей и фруктов. Согласно данным Организации по продовольствию и сельскому хозяйству при ООН (ФАО) примерно четверть от производимого в мире зерна поражена микотоксинами.

Большинство микотоксинов в неизменном виде попадают в организм животного, а также и человека. Они поражают печень, почки, желудочно-кишечный тракт, селезенку, мозг, нервную систему, разрушают иммунитет потребителя зараженных продуктов. Отравление может проявиться не сразу – микотоксины, накапливаясь в организме, могут вызывать тяжелые, в том числе онкологические заболевания, спустя длительное время. Наличие микотоксинов в кормах приводит к ухудшению репродуктивности животных.

На сегодняшний день известны более трехсот микотоксинов, большинство из них проявляют токсическое действие в отношении животных и птицы. Наиболее изучены свойства самых распространенных: афлатоксина, охратоксина, фумонизина, некоторых микотоксинов из группы трихотеценов, зеараленона. Зараженность одних и тех же продуктов значительно отличается в разных географических областях и колеблется в зависимости от сезона и других факторов.

Микотоксины, распространенные в Санкт-Петербурге и Ленинградской области:

– Афлатоксины. Они обладают сильными канцерогенными свойствами. Оптимальная температура для их образования 27–30 °С, хотя синтез афлатоксинов возможен в диапазоне температур 12–42 °С. Афлатоксин В1 – мощный мутаген, вызывающий хромосомные отклонения. В России приняты следующие санитарно-гигиенические нормативы по афлатоксинам: ПДК афлатоксина В для пищевых продуктов, кроме молока, составляет – 5 мкг/кг, допустимая суточная доза (ДСД) – 0,005–0,01 мкг/кг массы тела.

– Охратоксины - соединения высокой токсичности с ярко выраженным терратогенным эффектом. Из всех охратоксинов наиболее опасным является охратоксин А. Это бесцветное кристаллическое вещество, слаборастворимое в воде, умеренно растворимое в органических растворителях (метанол), а также в водном растворе гидрокарбоната натрия. В ультрафиолетовом свете обладает зеленой флуоресценцией [6].

– Трихотецены представляют собой большую группу химически сходных токсинов, насчитывающих около 190 веществ, продуцируемых грибами различных видов, включая *Fusarium*, *Myrothecium*, и *Stachybotrys*. Подразделяют на четыре типа: А, В, С и D. Представители группы А: токсин Т-2 и диацетокси-скирпенол, группы В: дезоксиниваленол и ниваленол, группы С: роридин А, группы D: кротоцин [6].

Микотоксины создают реальную опасность для здоровья животных и человека. Они устойчивы к действию физических и химических факторов, поэтому удаление их из пищевых продуктов представляет трудную задачу. Общепринятые способы технологической и кулинарной обработки лишь частично уменьшают их содержание в продукте [7]. Высокая температура (свыше 200°), замораживание, высушивание, воздействие ионизирующего и ультрафиолетового излучения оказались также малоэффективными.

Для профилактики, вызываемых ими заболеваний и снижения экономического ущерба, микотоксины необходимо выводить из организмов животного и человека связанными сорбентами.

В Табл. 4 представлены результаты оценки свойств готового продукта в отношении микотоксинов. Исследование сорбционной емкости микотоксинов оболочкой дрожжевой клетки проводилось по ГОСТ Р 52471-2005 «Корма. Иммуноферментный метод определения

микотоксинов» (ПКПД – практический коэффициент полезного действия, сорбционная способность продукта).

Таблица 4

Сравнение свойств сорбентов в отношении микотоксинов

№ п/п	Наименование сорбента	Обнаруженная сорбционная активность в отношении:	ПКПД, %
1	Разработанный сорбент	Афлатоксин В1 Охратоксин Т-2 токсин ДОН	50 % 70 % 0 11,4 %
2	Сорбент № 1 (Фунгистат)	Афлатоксин В1 Охратоксин Т-2 токсин ДОН	53 % 45 % 48 % 0
3	Сорбент № 2 (Фунгистат)	Афлатоксин В1 Охратоксин Т-2 токсин ДОН	50 % 46 % 68 % 0

Полученный в ходе экспериментов сорбент (п. 1, Табл. 4) имеет пониженное содержание низкомолекулярной фракции протеинов. Его сорбционная емкость к ряду токсинов следующая: по афлатоксину В1 он близок к аналогам, таким как фунгистат (п. 2 и 3, Табл. 4); по охратоксину – в полтора раза выше; по Т-2 токсину проигрывает, а по токсину ДОН имеет сорбционную способность, равную 11,4 % (в то время как фунгистат – нулевую).

Таким образом, технология, при которой увеличивается перевариваемость ОПД, приводит к дополнительному (побочному) эффекту и позволяет получить из него дешевый биологически ценный сорбент, который по своим свойствам близок к дорогостоящим сорбентам, представленным на рынке.

### Содержание глутатиона в продукте, полученном из ОПД

По своему составу ОПД являются хорошим источником высоко- и низкомолекулярных биологически активных веществ. Среди внутриклеточных метаболитов дрожжей особый интерес представляют тиол-содержащие вещества. К их числу относится водорастворимый антиоксидант – трипептид глутатион, на который приходится до 90 % внутриклеточных низкомолекулярных тиолов. Достоинство этого компонента состоит в том, что он участвует в окислительно-восстановительном гомеостазе, защите клеточных структур от повреждающего действия активных форм кислорода, регуляции активности ферментов и иммунных реакций.

С точки зрения опасности развития целого ряда хронических неинфекционных болезней, объединяемых в группу свободнорадикальной патологии, нужно стремиться избегать не только истощения глутатиона, а всего пула биоантиоксидантов, функционирующих в составе физиологической антиоксидантной системы организма.

Использование в составе БАД восстановленного глутатиона до сравнительно недавнего времени встречало возражения, основывающиеся на том, что биосинтез и деградация эндогенного глутатиона объединены в глутамильный цикл, согласно которому определенные ферменты щеточной каймы эритроцитов осуществляют деградацию GSH до соответствующих аминокислот. Поэтому в первую очередь внимание исследователей было направлено на изыскание путей повышения его внутриклеточного уровня оральным введением соответствующих предшественников (глутаминовой кислоты, цистеина или метионина и глицина) либо в виде свободных аминокислот, либо в составе белков. Однако, по данным института питания РАМН, ситуация существенно изменилась, так как в последнее десятилетие появились сообщения, свидетельствующие о том, что глутатион может в интактном виде всасываться в желудочно-кишечном тракте млекопитающих. Исследования проводились как *in vitro* с вывернутой тонкой кишкой и везикулами из щеточной каймы, так и *in vivo*.

Суточное потребление общего глутатиона, определяемое как сумма содержания глутатиона + всех дисульфидных форм, составило 13–110 мг/день, в среднем –  $35 \pm 2$  мг/день. С фруктами и овощами поступает более 50 % глутатиона, а с мясными продуктами – менее 25 %. Слабая отрицательная корреляционная связь наблюдается между поступлением пищевого глутатиона и глутатиона плазмы крови. Эти данные свидетельствуют о том, что имеется сложная регуляция уровня глутатиона в крови, а не простая прямая зависимость между поступлением пищевого глутатиона или его предшественников в желудочно-кишечный тракт.

Следовательно, глутатион может использоваться в терапевтических целях как при введении его предшественников в составе белка, так и собственно глутатиона как БАД или в составе продуктов питания, то есть:

– при нормальных условиях и достаточном для организма животного поступлении серосодержащих аминокислот содержание тканевого глутатиона в составе белка повышается и соответственно увеличивается антиоксидантная клеточная устойчивость;

– в условиях окислительного стресса, токсического действия некоторых лекарств или при заражении инфекцией поступление серосодержащих аминокислот может оказаться недостаточным.

И если обсуждать перспективы использования собственно пищевого глутатиона, то относительно доз могут быть приведены следующие оценки: поступление глутатиона в организм в день составляет около 1 г, а норма – 3 г в сутки. Считается, что поступление в организм меньше 1 г глутатиона, недостаточно для существенного увеличения его в тканях [8]. Однако если речь идет о тонкой кишке, то 100–200 мг глутатиона на один прием вполне достаточно для того, чтобы его концентрация в просвете кишки была более 0,5 мм, что обеспечивает в ней эффективную детоксикацию. Это может быть полезным при химио- и радиотерапии онкологических больных, детоксикации пищевых токсикантов, лечении ожоговых больных.

Исследование содержания глутатиона в ОПД проводилось по методу Починок Х.Н. [9] (рис. 4). Образец № 1 – сухой продукт, полученный по предлагаемой выше технологии. Образец № 2 представляет собой дрожжи горькие, с малым сроком хранения. Их использование в качестве вторичного продукта затруднительно. Этот образец дрожжей не подвергался никакой технологической обработке.

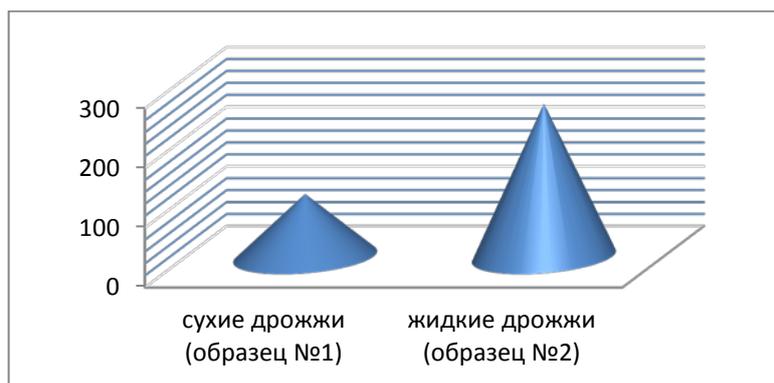


Рис. 4. Содержание глутатиона в ОПД

Из гистограммы на рис. 4 видно, что самое большое содержание глутатиона приходится на образец № 2, однако, перевариваемость дрожжей в этом случае равна 15–20 %, что мало, по сравнению с дрожжами прошедшими обработку (91–92 %). Следовательно, организм человека или животного сможет усвоить глутатион, содержащийся в ОПД в образце № 2 на (51,75 мг/100 г), а в образце № 1 – на (96 мг/100 г).

#### **Разработка теоретических положений тепло- и массопереноса в процессе сушки**

Для получения сухих порошкообразных дрожжей предложено использовать сушильную установку со встречно-закрученными потоками инертных тел, разработанную на кафедре ТМРПиКХ и выпускаемую по лицензии (рис. 5) [10, 11].

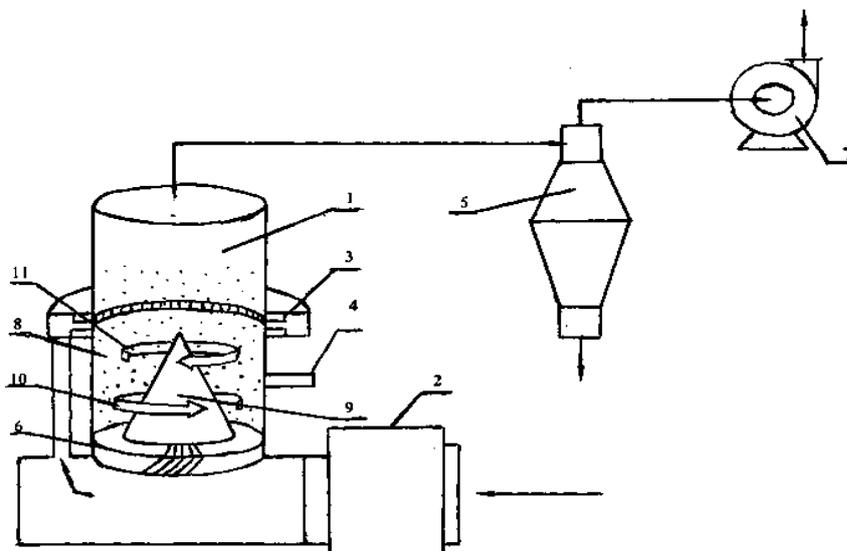


Рис. 5. Схема сушильной установки: 1 – сушильная камера; 2 – теплогенератор; 3 – верхняя газораспределительная решетка; 4 – пневматический распылитель; 5 – циклон; 6 – нижняя газораспределительная решетка; 7 – вентилятор; 8 – инертные тела; 9 – конус; 10 – нижний слой закрученных инертных тел; 11 – верхний слой закрученных инертных тел

В аппарате продукт через пневматический распылитель наносится на инертные тела (вращающиеся кубики из фторпласта). Тепло передается конвективно от газообразного теплоносителя. Готовый порошкообразный продукт разгружается через циклон. Сушка осуществляется в тонком слое продукта, нанесенного на поверхность инертных тел [12]. В связи с весьма малой толщиной сухого слоя полагаем, что процесс сушки осуществляется преимущественно в первом периоде.

Поток влаги с поверхности продукта  $m$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , может быть представлен следующим образом:

$$m = \beta(X(\Theta) - X(T)), \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $X(\Theta)$  – влагосодержание воздуха у поверхности продукта,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , как функция от температуры продукта  $\Theta$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $X(T)$  – влагосодержание воздуха в ядре омывающего потока,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , как функция его температуры  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Конвективный поток тепла направлен к поверхности продукта и расходуется на испарение влаги.

$$mr = \alpha(T - \Theta), \quad (2)$$

где  $r = 2,3 \cdot 10^6$   $\text{Дж}/\text{кг}$  – удельная теплота парообразования воды,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи к поверхности продукта,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Уравнение (2) выражает тот факт, что энергия для испарения воды с поверхности продукта передается конвекцией из окружающего воздуха. Далее, коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$  связаны известным соотношением Льюиса, справедливым при турбулентном обтекании тел:

$$\alpha = \beta \rho C, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C$  – удельная теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/\text{кг}$ . Если теплоемкость  $C$  практически не зависит от температуры в рассматриваемых температурных пределах и равна  $C = 10^3$   $\text{Дж}/\text{кг}$ , то плотность  $\rho$  наоборот сильно зависит от температуры, и в приближении идеального газа может быть представлена следующим образом:

$$\rho = \frac{p}{R(T + 273)}, \quad (4)$$

где  $p$  – давление воздуха внутри аппарата,  $\text{Па}$ ;  $R = 287$   $\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$  – газовая постоянная для воздуха. Давление воздуха внутри аппарата незначительно отличается от атмосферного и составляет  $p = 10^5$   $\text{Па}$ . Из совместного решения системы (1)–(4), получим:

$$X(\Theta) - X(T) = \frac{pC}{rR} \frac{T - \Theta}{T + 273} = \frac{T - \Theta}{T + 273} \cdot 1,09 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (5)$$

Примем модели перемешивания для частиц продукта и идеального вытеснения для газа идеальными [12, 13]. Это означает, что части инертных частиц с нанесенным на них продуктом, перемещаясь по объему аппарата, имеют одинаковую температуру  $\Theta$ . Температура газа  $T$  при продвижении от входа к выходу плавно понижается от начальной  $T_b$  до конечной  $T_e$ . Точно также влагосодержание воздуха  $X$  повышается от начального значения  $X_b$  на входе в аппарат до конечного  $X_e$ . Запишем условие того, что воздух в аппарате насыщается влагой, испарившейся с поверхности продукта за счет тепла, отнятого от воздуха:

$$rdX = -\rho C dT = -\frac{pC}{R} \frac{dT}{T + 273}; \quad dX = -\frac{dT}{T + 273} \cdot 1,09 \text{ kg} / \text{m}^3. \quad (6)$$

Уравнение (6) является приближенным: оно не учитывает теплотерьер и расхода тепла на нагрев продукта от начальной температуры до  $\Theta$ , так как, в случае сушки дрожжей, продукт поступает уже подогретым. Непосредственное интегрирование уравнения (6) дает результат:

$$X_e - X_b = \ln\left(\frac{T_b + 273}{T_e + 273}\right) \cdot 1,09 \text{ kg} / \text{m}^3. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (5), получим:

$$\frac{dX}{X(T) - X(\Theta)} = \frac{dT}{T - \Theta}. \quad (8)$$

Интегрируя (8) в пределах от начальной температуры (влагосодержания) до конечной и потенцируя, получим:

$$\frac{X(\Theta) - X_b}{X(\Theta) - X_e} = \frac{T_b - \Theta}{T_e - \Theta}; \quad \Theta = \frac{T_e(X(\Theta) - X_b) - T_b(X(\Theta) - X_e)}{X_e - X_b}. \quad (9)$$

Соотношения (7) и (9) и являются системой уравнений для определения температуры готового продукта  $\Theta$ . Для выполнения конкретных расчетов необходимо задаться следующими параметрами: температура воздуха на входе и выходе  $T_b$  и  $T_e$ , начальное влагосодержание воздуха  $X_b$ , а также зависимость влагосодержания воздуха над поверхностью продукта от его температуры  $X(\Theta)$ . Далее расчеты идут следующим образом: из выражения (7) определяется конечное влагосодержание воздуха  $X_e$ , а из (9) – искомая температура (поскольку  $\Theta$  входит и в правую часть (9), то решать его необходимо методом последовательных итераций или каким либо иным приближенным методом). Влагосодержание  $X(\Theta)$  определялось посредством серии изопиестических экспериментов, оно зависит не только от температуры  $\Theta$ , но и от влагосодержания продукта  $U$ . Если зависимость от  $U$  является существенной, то в (9) необходимо подставлять усредненное по  $U$  от начального  $U_b$  до конечного  $U_e$  влагосодержание  $X(\Theta)$ . В случае, если сушка происходит в первом периоде, то есть испарение с поверхности продукта идет, как со свободной поверхности воды, в качестве  $X(\Theta)$  можно взять соответствующую зависимость для насыщенного водяного пара [4]. Проведенные расчеты для этого случая показали, что в пределах изменения параметров  $T_e = 80\text{--}120$  °С;  $T_b = 120\text{--}220$  °С;  $X_b = 0,005\text{--}0,015$  кг/м<sup>3</sup>, температура продукта  $\Theta$  в основном зависит от начальной температуры воздуха  $T_b$ , значения которой приведены в Табл. 1.

Таблица 5

Значения температуры продукта  $\Theta$  от начальной температуры воздуха  $T_b$  для первого периода сушки.

$T_b$ , °С	120	140	160	180	200	220
$\Theta$ , °С	65	70	74	78	82	85

Для расчета продолжительности высухания пленки продукта рассмотрим связь массы пленки с ее влажностью. Пусть  $D$  – масса сухих веществ пленки, а  $M$  – масса влаги. Тогда

$$U = \frac{M}{M+D}; M = \frac{UD}{1-U}; dM = \frac{DdU}{(1-U)^2}. \quad (10)$$

Запишем уравнение (1) в дифференциальной форме:

$$dM = -\beta(X(\Theta) - X(T))Sd\tau. \quad (11)$$

Подставляя уравнение (11) в (10) получим:

$$dM = \frac{DdU}{(1-U)^2} = -\beta S(X(\Theta) - X(T))d\tau = -\frac{\beta S}{R(\Theta + 273)}(p(\Theta, U) - p_a), \quad (12)$$

где  $S$  – площадь поверхности частиц. Знак минус появился в связи с уменьшением влажности и массы. Для вычисления времени сушки выражаем  $d\tau$  из (12) и интегрируем по  $U$  от  $U_b$  до  $U_e$ :

$$\tau = -\frac{DR(\Theta + 273)}{\beta S} \int_{U_b}^{U_e} \frac{dU}{(p(\Theta, U) - p_a)(1-U)^2}. \quad (13)$$

Если сушка идет в первом периоде и  $p(\Theta)$  не зависит от  $U$ , то вместо интеграла (12) получаем:

$$\tau = -\frac{DR(\Theta + 273)}{\beta S(p(\Theta) - p_a)} \frac{U_b - U_e}{(1-U_b)(1-U_e)}.$$

Если напыляется несколько слоев, то (12) (или (13)) необходимо умножить на их количество.

### Основные достигнутые результаты

Разработана технология получения обезгорченных ОПД с высокими перевариваемостью и сорбционной способностью. Для этого:

- подобран катализатор и разработаны технологические параметры процесса удаления горечи из ОПД. Предложен способ, предотвращающий потемнение пивных дрожжей;
- на основе теоретических и экспериментальных исследований представлена технология удаления плотной оболочки с поверхности дрожжевой клетки ОПД. Показано, что эта оболочка является сорбентом микотоксинов. Представлены результаты исследования ее сорбционной способности;
- разработана технология увеличения перевариваемости готового продукта;
- проведены исследования по определению остаточной горечи в готовом продукте;
- проведен анализ остаточного содержания нуклеиновых кислот (высокомолекулярных) в готовом продукте;
- определено содержание глутатиона в ОПД;
- на основе теоретических исследований тепло- и массопереноса разработана технология сушки ОПД, подобрано оборудование и режимы ее обеспечивающие;
- реализовано внедрение готового продукта в производство на предприятия мясо-, рыбоперерабатывающей и хлебопекарной промышленности в консервное производство при выпуске различных видов начинок для мучных, кондитерских изделий и джемов, а также на предприятия комбикормовой промышленности для изготовления комбикормов обогащенных белком, витаминами и минеральными веществами.

### Области возможного использования результатов проекта

1. Сухие пивные дрожжи целесообразно использовать в фармацевтической промышленности для восполнения дефицита глутатиона, как регулятора окислительно-восстановительных процессов в организме, а также витаминов, как эффективного средства для укрепления иммунитета.

2. Сухие пивные дрожжи с повышенной перевариваемостью можно использовать при изготовлении миксов комбикормов как для крупного рогатого скота и свиней, так и для птицы.

Они представляют собой ценность как дополнительный фактор питания, улучшающий использование других питательных веществ. Препараты, полученные с применением автолизата пивных дрожжей, активно влияют на пищеварение животных, стимулируя и регулируя процессы, протекающие в пищеварительном тракте, начиная с рецепторного аппарата ротовой полости и заканчивая регуляцией активности секреторных желез. Антиоксидантное действие препарата повышает активность иммунной системы, способствует нормализации обменных процессов.

3. Пивные дрожжи, прошедшие стадию удаления горечи, можно применять в различных областях: мясо-рыбоперерабатывающей и хлебопекарной промышленности, а также при приготовлении начинок, джемов и конфитюров для обогащения их белком, витаминами и минеральными веществами;

4. Технология удаления плотной оболочки с поверхности пивных дрожжей позволяет получить из ОПД биологически ценный продукт, который проявляет сорбционную способность микотоксинов в организме животных и человека. Данный продукт целесообразно использовать при производстве кормовых продуктов, а также продуктов питания широкого ассортимента спектра.

### Публикации

1. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Шкотова Т.В., Чичина Т.В. К вопросу об удалении горечи из отработанных пивных дрожжей // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 4. С. 67–69.
2. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Шкотова Т.В., Чичина Т.В. Кинетические закономерности процесса сушки пивных дрожжей // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 4. С. 93–95.
3. Чичина Т.В. Технология обезгоречивания отработанных пивных дрожжей // Сб. трудов молодых ученых. Ч. I. СПб., 2012. С. 10–15.
4. Куцакова В.Е., Шкотова Т.В., Ефимова С.В., Чичина Т.В. Способ получения белковой пищевой и кормовой добавки // Пищевые инновации и биотехнологии: Мат-лы Международного научного форума. Кемерово, 2013. С. 181–186.
5. Чичина Т.В., Шкотова Т.В., Куцакова В.Е. Использование отработанных пивных дрожжей в пищевой и кормовой промышленности // Сб. тезисов докладов конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 9–12 апреля 2013 г.). Вып. 4. СПб., 2013. С. 106–108.
6. Чичина Т.В. Разработка технологии гидролиза отработанных пивных дрожжей // Сб. по итогам XLII научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. СПб., 2013.
7. Куцакова В.Е., Шкотова Т.В., Богомолов В.В., Ефимова С.В., Чичина Т.В. Белковая кормовая добавка из отработанных пивных дрожжей // Агропромышленный комплекс: Состояние, проблемы, перспективы: Сб. статей VIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2012. С. 96–99.
8. Куцакова В.Е., Шкотова Т.В., Ефимова С.В., Чичина Т.В. Технология получения белковой пищевой и кормовой добавки // Актуальная биотехнология. 2013. № 1 (4). С. 19–21.

### Литература

1. Bekatorou A. et al. Food grade yeasts // *Food Technology and Biotechnology*. 2006. Vol. 44. No 3. P. 407–415.
2. Process for brewer's yeast debittering: US Patent 5716653. Issued on February 10, 1998.
3. Bendová O., Kotyk A., Basařová G., Kahler M. Stanovení nukleových kyselin // *Kvasinky ve výzkumu a praxi*. Praha, 1986.
4. Билай В.И., Пидопличко Н.М. Токсикообразующие микроскопические грибы. Киев, 1970. – 292 с.
5. Оценка загрязнения пищевых продуктов микотоксинами / Под ред. В.А. Гутельяна. Т. 1–3. М., 1985.
6. Гутельян В.А., Кравченко Л.В. Микотоксины (Медицинские и биологические аспекты). М., 1985. – 320 с.

7. Малков М.А., Богомолов В.В., Данькова Т.В., Краснов К.А. Микотоксины – стратегия устранения их влияния на организм сельскохозяйственных животных и птицы // Технология животноводства. 2010. № 1–2. С. 4–5.
8. Dahm L.J., Samiec P.S., Eley J.W. et al. Free radicals: From basic science to medicine. Basel, 1993.
9. Починок Х.Н. Методы биохимического анализа растений. Киев, 1976. – 336 с.
10. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Шкотова Т.В., Чичина Т.В. К вопросу об удалении горечи из отработанных пивных дрожжей // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 4. С. 67–69.
11. Кунце В. Технология производства пива. М., 1999. – 328 с.
12. Куцакова В.Е., Богатырев А.Н. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов. М., 1987. – 236 с.
13. Материал из Википедии – свободной энциклопедии.



**Шаветов Сергей Васильевич**  
**Факультет компьютерных технологий и управления**  
**Кафедра систем управления и информатики**  
**E-mail: sergyo777@ya.ru**

## **СИСТЕМА УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ**

С.В. Шаветов

Научный руководитель – профессор А.А. Бобцов

### **Цель и задачи проекта**

Активное развитие телекоммуникационных технологий и микропроцессорной техники ставит синтез систем управления объектами, удаленными на достаточное расстояние от задающего устройства, одним из ведущих направлений в области современной теории управления. Цель проекта – разработка универсальной системы управления мехатронными робототехническими комплексами через глобальную сеть Интернет независимо от типа комплекса и места размещения объекта управления и задающего устройства.

Проблема удаленного управления связана с решением совокупности задач, подразумевающих управление в условиях канальных ограничений. В самом широком смысле канальные ограничения включают:

- управление через Интернет и связанное с ним, а также и присущее мехатронным комплексам, запаздывание;
- ограниченность сигнала управления объектами, вызывающая раннее насыщение и приводящая к потере объектом устойчивости;
- оптимальную частоту дискретизации;
- ограниченную пропускную способность канала связи и связанную с ней скорость передачи информации;
- трансляцию видеопотока.

### **Методы исследования**

Для решения задач проекта был определен ряд объектов, для которых проводилась разработка системы управления. Класс технических устройств, в которых используются системы автоматического управления, расширяется с каждым днем вместе с развитием современной техники. Происходит тесная интеграция аппаратных и программных частей устройств, выливающаяся в совокупные системы, называемые «мехатронными». Считается,

что впервые термин «мехатроника» введен японцем Тецуро Мориа (Tetsuro Moria), старшим инженером компании Yaskawa Electric, в 1969 г. Термин состоит из двух частей – «меха», от слова механика и «троника», от слова электроника.

В широком понимании данного слова подразумевается слияние знаний из трех областей наук:

- электроники, включающей микроэлектронику, силовую электронику, преобразователи и измерители информации;
- механики и электромеханики, включающих механические элементы, машины, приводы, точную механику и электрические элементы;
- информационных технологий, включающих теорию систем, моделирование, программное обеспечение, искусственный интеллект.

Таким образом, большинством технических объектов автоматического регулирования и автоматизации являются мехатронные системы и комплексы. Из-за широкого разнообразия их конструкций и сфер использования выделение какой-либо достаточной классификации подобных систем представляется непростой задачей. Системы из разных классов так или иначе будут связаны по нескольким критериям.

В качестве наиболее яркого и распространенного примера системы удаленного управления техническими объектами можно рассмотреть IP PTZ (panorama-tilt-zoom) камеры (рис. 1а, 1б), управление которыми может происходить через локальную сеть или Интернет. Рис. 1в, 1г иллюстрируют работу специального программного обеспечения, скрывающего нежелательные области изображения. Прогресс в системах удаленного управления демонстрируют игровые проекты, позволяющие, не выходя из дома, управлять различными объектами [1–3].

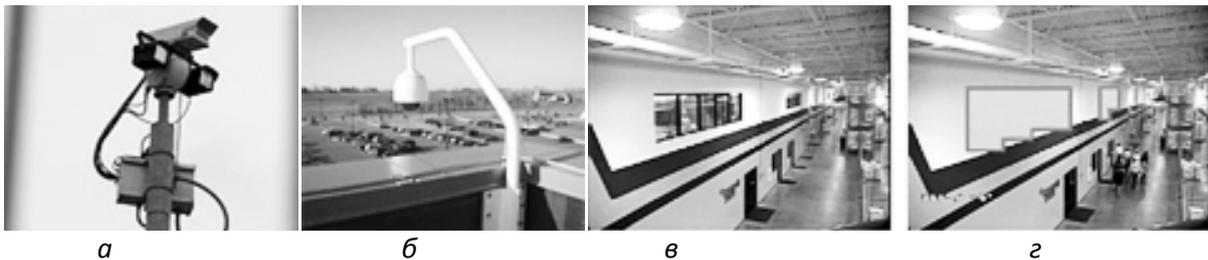


Рис. 1. IP PTZ видеокамеры

В статьях [4, 5] представлены разработки двух коллективов, связанные с научными проблемами удаленного управления. В Институте прикладной математики им. Келдыша РАН [1] разрабатывали систему управления роботом-манипулятором через Интернет. Для сокращения временных задержек и обеспечения быстрого отклика системы на действия оператора в проекте проводится работа с трехмерными компьютерными моделями робота и его рабочего пространства.

В Техасском университете [4] было предложено сетевое управление шаром на магнитной подвеске с использованием предиктора команд. На рис. 2 видно, что при потере или большой задержке сигнала от управляющего компьютера, предиктор предсказывает на основе полученных ранее команд сигнал управления, тем самым реализуя непрерывность процесса.

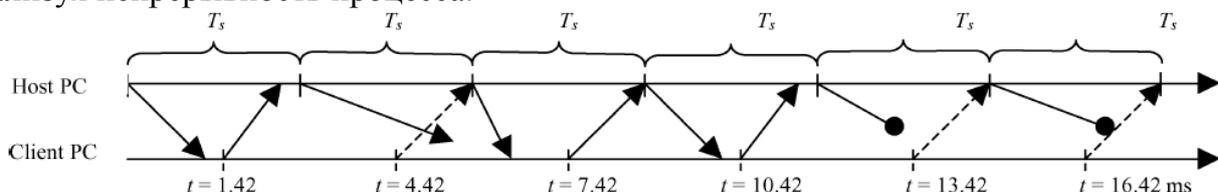


Рис. 2. Работа предиктора команд

Обзор методов управления в условиях запаздывания и ограниченной пропускной способности представлен в работе [6]. Один из подобных алгоритмов управления

мехатронным комплексом модели вертолета в условиях информационных ограничений предложен в статье [7].

На первый взгляд может показаться, что рассмотренные проблемы успешно решены многие годы назад, однако это не так. Главным является то, что система удаленного управления создается, как правило, под каждый конкретный объект, а это ведет к удорожанию разработки и увеличивает время ее внедрения. Другая проблема связана с сугубо техническими решениями подобных систем (как было показано с PTZ камерами), когда применение алгоритмов управления с запаздыванием попросту не используется, тем самым снижая их эффективность. Стоит отметить, что разработки научных коллективов носят теоретический характер и редко применяются на практике. В настоящей работе предложено комплексное решение этих проблем в единой универсальной системе управления.

Для научной составляющей системы удаленного управления подходы синтеза системы автоматического управления выделялись из известных методов, перечисленных ниже:

1. Методы с большими коэффициентами усиления. Данный вариант наиболее прост для реализации, но подходит лишь для общих несложных задач. Большим его недостатком является усиление всех шумов и возмущений вместе с полезным сигналом, что зачастую приводит к дестабилизации системы управления.

2. Комбинированные методы управления с наблюдателями неопределенности. Этот подход достаточно эффективен, однако требует регулятора большого порядка и, следовательно, сложен в программной реализации. Комбинированные методы, как правило, лишены недостатков точностных свойств переходных процессов, однако негативно отражаются на времени переходных процессов, что является нежелательным для рассматриваемых в проекте задач.

3. Методы управления в рамках качественной экспоненциальной устойчивости. Это современный удобный подход к синтезу систем управления, обеспечивающий малую область сходимости и, следовательно, низкое время переходных процессов. Эти методы, ввиду сложности математического аппарата для аналитического синтеза регулятора, требуют от специалиста достаточной подготовки в области теории управления. Для поиска оптимального функционала качества по заданным критериям необходимы сравнительно высокие вычислительные мощности.

4. Адаптивные методы управления с идентификацией параметров требуют точной параметризации математической модели и достаточного времени для настройки параметров. Иногда это может плохо отражаться на сложных математических моделях. Возникающее запаздывание может привести к нарушению условий устойчивости объекта.

5. Адаптивные методы управления с эталонной моделью требуют построения адекватной эталонной модели для выработки требуемого управляющего воздействия. К сожалению, в реальных объектах сложно предусмотреть все возмущающие воздействия, поэтому данные методы эффективны лишь в модельном представлении.

6. Адаптивные методы управления с настраиваемой моделью. Это наиболее оптимальный подход к решению задач, однако, необходимо определить узкий круг настраиваемых параметров, чтобы предотвратить слишком большое время переходных процессов.

7. Стохастические методы управления. Вероятностный подход позволяет статистически оценить значения параметров. Основные проблемы – время идентификации и точность. В данном подходе в полной мере проявляется принцип неопределенности Гейзенберга в том смысле, что невозможно одновременно быстро и точно идентифицировать параметры – какой-то из критериев обязательно окажется в проигрыше.

Как видно, многие современные методы синтеза систем автоматического управления обладают одним главным недостатком – запаздыванием, что крайне неприемлемо для систем управления сложными мехатронными комплексами. В проекте использован оптимальный метод управления, реализующий наилучшее, по показателям качества, решение поставленных задач для достижения цели работы.

### Достиженные результаты

В процессе исследования:

- синтезирован алгоритм удаленного управления мехатронными робототехническими комплексами;
- разработан интерфейс взаимодействия оператора и объекта управления через глобальную сеть Интернет, либо через любую другую сетевую организацию на основе подходящего протокола;
- апробирован алгоритм управления и интерфейс связи в реальном техническом объекте – мобильном роботе.

Первостепенной задачей при удаленном управлении является обмен телеметрической информацией с объектом управления (ОУ), который может находиться сколь угодно далеко от задающего устройства (ЗУ) (оператора). Единственным требованием, выдвигаемым к ОУ и ЗУ, является доступность Интернет-канала достаточной пропускной способности и возможность подключения к сети Интернет ОУ.

Второй важной задачей является контроль положения мехатронного комплекса в пространстве. Следовательно, требуется организовать видеотрансляцию либо с самого объекта, либо со стороны. На рис. 3 представлена реализованная архитектура системы управления, решающая перечисленные задачи.

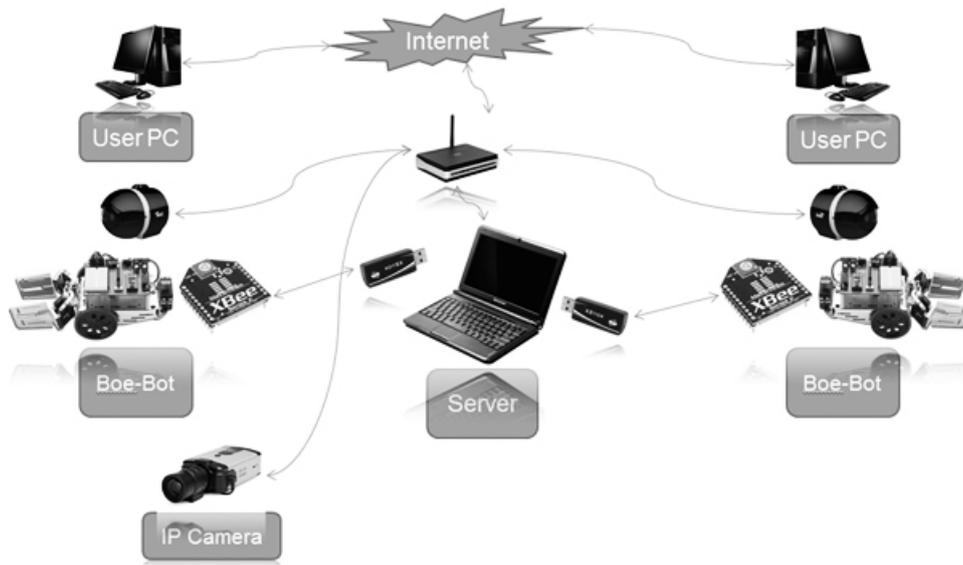


Рис. 3. Архитектура системы управления

К серверу подключены через интерфейсы «последней мили» объекты управления. В данном случае это роботы Bое-Bot от компании Parallax, подключенные по интерфейсу ZigBee; также были апробированы роботы Lego Mindstorms NXT, подключенные по интерфейсу Bluetooth). Сервер соединен по Ethernet/Wi-Fi с маршрутизатором, имеющим доступ к глобальной сети Интернет. Обменом телеметрической информацией между удаленным пользователем и мехатронным комплексом занимается специальное программное обеспечение (ПО) на Сервере. Для минимизации задержек используется современная технология web-сокетов, наиболее полно и удобно для разработчика реализованная в nodeJS. При апробации системы управления задержки по управлению составляли 20–50 мс.

В данной архитектуре для реализации видеовещания непосредственно с ОУ используются мобильные Wi-Fi IP видеокамеры, подключаемые к маршрутизатору. В случаях, когда требуется организовать видеовещание со стороны, целесообразнее использовать статичные IP камеры. Для сокращения временных задержек в видеовещании можно использовать аналоговые радиокамеры с аппаратным энкодером. Специальный процессор позволяет аппаратному энкодеру выдавать кодированный поток быстрее, чем программными средствами. Однако, при использовании мобильных IP камер при вещании по локальной сети задержки составили 200 мс в формате MJPEG, который поддерживает большинство браузеров,

и 500 мс при вещании через сеть Интернет. Для поставленных задач такие результаты являются приемлемыми и дальнейшие исследования аналогового вещания не проводились.

Использованный в роботах алгоритм управления эффективно справляется с поставленными ранее задачами и со следующими проблемами теории автоматического управления:

1. Неопределенностью параметров объекта управления – зависимостью свойств (характеристик) объекта управления от неизвестных параметров (массы, момента инерции, коэффициента жесткости и пр.). При этом неизвестные параметры полагаются квазистационарными, то есть постоянными или медленно меняющимися (по сравнению с другими процессами в замкнутой системе).

2. Влиянием неконтролируемых внешних факторов, к которым относятся возмущающие воздействия и сигналы задания. В подавляющем большинстве практических случаев точная форма (или характер поведения) внешних воздействий остается неизвестной вплоть до начала работы системы управления. Поэтому, как правило, внешние условия функционирования реальных систем управления характеризуются высокой степенью неопределенности.

3. Недоопределенными (плохо определенными) задачами, в которых эталонная траектория движения задана неточно или ее аналитическое описание априорно неизвестно, а для формирования управления могут использоваться только текущие измерения отклонений от траектории.

4. Обеспечением малого сигнала управления. Быстрое насыщение привода приводит к потере эффективности управления, либо, зачастую, к потере устойчивости системы.

Последние две проблемы особенно актуальны в условиях канальных ограничений, когда передача большого количества информации нежелательна, так как может привести к негативным последствиям. Наиболее применимым является гибридный алгоритм управления, переключающий локальные регуляторы при определенных условиях.

Ниже приведена базовая версия алгоритма «последовательный компенсатор». В случае прямолинейного движения двухколесного мобильного мехатронного комплекса с неизвестными параметрами и относительной степенью при одинаковых характеристиках независимых сервоприводов, сигналы управления, непосредственно подаваемые на них, будут равны, и закон управления будет иметь вид:

$$u_1 = u_2 = u(t). \quad (1)$$

Для расчета сигнала управления  $u(t)$  используется метод последовательного компенсатора, опубликованный в [8–12]:

$$u(t) = -k\alpha(p)\xi_1(t), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma\xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma\xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1\xi_1 - k_2\xi_2 - \dots - k_{\rho-1}\xi_{\rho-1} + k_1y), \end{cases} \quad (3)$$

где число  $k > 0$ ,  $\alpha(p)$  – Гурвицев полином степени  $\rho - 1$ ,  $\rho$  – относительная степень выбираемой модели движения робота, число  $\sigma > k$ , коэффициенты  $k_i$  рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (3) при нулевом входе. В качестве возможного варианта настройки параметров  $k$  и  $\sigma$  предусмотрено увеличение их значения до тех пор, пока не будет выполнено следующее условие [12]:

$$|y(t)| < \delta_0 \text{ для } t \geq t_1, \quad (4)$$

где  $t_1 > t_0 \geq 0$  – желаемое время переходного процесса; малое положительное число  $\delta_0$  задается разработчиком системы управления. Для настройки параметра  $k$  используется алгоритм:

$$k(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau, \quad \sigma = \sigma_0 k^2, \quad (5)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & \text{при } |y(t)| > \delta_0, \\ 0 & \text{при } |y(t)| \leq \delta_0, \end{cases} \quad (6)$$

где числа  $\lambda_0 > 0$  и  $\sigma_0 > 0$ , условия выбора этих чисел подробно рассмотрены в [13].

В случае, когда траектория движения робота заранее неизвестна и необходимо двигаться вдоль нее, закон управления изменится в соответствии с данными датчика, измеряющего дистанцию до стены, вдоль которой происходит движение и кривизна которой заранее не определена. На основе траекторной ошибки формируются сигналы управления сервоприводами. Закон управления в таком случае примет вид:

$$u_1 = u_v(t) + u(t), \quad u_2 = u_v(t) - u(t), \quad (7)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – сигналы управления, подаваемые на сервоприводы, функция  $u_v$  выбирается линейной относительно скорости, с которой робот будет двигаться на прямом участке траектории, функция  $u$  вносит рассогласование между приводами, что приводит к повороту робота влево или вправо. Для расчета сигнала управления  $u(t)$  используются алгоритмы (2–6).

### Области возможного использования результатов проекта

Результаты работы могут быть востребованы как в прикладных задачах робототехники, так и в образовательных целях. Разработанная система управления может быть использована при создании мобильных мехатронных комплексов и роботов, в промышленности, на вредном производстве, в системах видеонаблюдения и безопасности. В связи с глобализацией, развитием облачных вычислений происходит повсеместное развитие сетевых технологий, перенос многих сервисов в виртуальное пространство. Больше нет необходимости в огромном количестве камер наблюдения – достаточно одной, установленной на мобильной платформе и управляемой удаленно из любой точки земного шара. Уезжая в отпуск, больше не нужно будет беспокоиться о своем жилище, используя камеру на мобильной платформе. Пользователь сможет в режиме реального времени посмотреть происходящее в своем доме. В промышленности при использовании дорогостоящего оборудования при возникновении нештатных ситуаций не потребуется вызывать специалиста из другого города или государства – он сможет удаленно настроить и апробировать настройки прямо со своего рабочего места. Наконец, вредное для человека производство можно будет отдалить на сотни километров. Таким образом, представленные в проекте разработки являются весьма актуальными и перспективным для дальнейшего развития, внедрения в производство и пр.

Разработанная система удаленного управления является универсальной, в которой работа производится с последовательным портом, следовательно, любое устройство, подключенное через интерфейс, способный работать в качестве последовательного порта может быть подключено к управляющему серверу. Работоспособность объекта будет зависеть от управляющей программы мехатронного комплекса и набора команд, определенного сервером. Простая и надежная система видеовещания, независимая от объекта управления, минимизирует расходы на ее внедрение в существующих мехатронных комплексах.

### Публикации

1. Bobtsov A., Pyrkin A., Kolyubin S., Surov M., Shavetov S., Borisov O., Gromov V. Simple output stabilization approach for robotic systems // 7<sup>th</sup> IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control. P. 1. Saint Petersburg, 2013. P. 1873–1878.
2. Шаветов С.В., Ведяков А.А. Система удаленного управления мехатронными комплексами // Навигация и управление движением: Мат-лы XV Конференции молодых ученых (12–15 марта 2013 г., Санкт-Петербург, Россия): <http://www.elektropribor.spb.ru/kmu2013/progr>.

## Литература

1. MikroGonki: <http://www.mikrogonki.ru>.
2. Glavbot: <http://www.glavbot.ru>.
3. Joker Racer: <http://www.jokerracer.com>.
4. Белоусов И.Р. Алгоритмы управления роботом-манипулятором через Интернет // Математическое моделирование. 2002. Т. 14. № 8. С. 10–15.
5. Kim W.-j., Ji K., Srivastava A. Network-based control with real-time prediction of delayed / lost sensor data // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2006. Vol. 14. No 1. P. 182–185.
6. Андриевский Б.Р., Матвеев А.С., Фрадков А.Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: К единой теории управления, вычисления и связи // Автоматика и телемеханика. 2010. № 4. С. 34–99.
7. Fradkov A.L., Andrievsky B., Peaucelle D. Estimation and control under information constraints for LAAS helicopter benchmark // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2010. Vol. 18. No 5. P. 1180–1187.
8. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. 2010. N2. P. 129–139.
9. Bobtsov A.A. Discussion on: “Positive Real Control for Uncertain Singular Time-delay Systems via Output Feedback Controllers” // European Journal of Control. – 2004. – №4. – P. 305–306.
10. Bobtsov A.A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity // Automatica. – 2005. – №12. – P. 1277–1280.
11. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. A new approach to MRAC problem with disturbance rejection // 9th IFAC Workshop ALCOSP. Saint-Petersburg. Russia. 2007.
12. Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. Experimental research of consecutive compensator approach on basis of mechatronic systems // 6th EUROMECH Conference ENOC. Saint-Petersburg. Russia. 2008.
13. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Последовательный компенсатор в задаче управления однозвенным роботом-манипулятором с гибкими связями // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. – 2006. – №8. – С. 2–7.  
конференции «Неделя науки СПбГПУ». СПб., 2012. С. 136–137.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифоров – СПб.: Университет ИТМО, 2014. – 301 с.

СБОРНИК ТРУДОВ АСПИРАНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,  
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ  
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Под редакцией проф. В.О. Никифорова

Дизайн обложки А.А. Кушнаренко

Редакторы:

А.В. Бутина, И.А. Лапшина

Лицензия ИД № 00408 от 5.11.2013

Подписано в печать 04.07.2014

Заказ 3160 Тираж 100

ISBN 978-5-7577-04-83-8