

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**СБОРНИК РАБОТ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ
УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2020

Сборник работ студентов и аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова – СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 144 с.

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



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Авторы, 2020



Победители конкурса от Университета ИТМО на церемонии награждения XXIV Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов, 12 декабря 2019 года в Многофункциональном комплексе «Горный»

Университет ИТМО – один из ведущих вузов Российской Федерации по целому ряду научных направлений. Он располагает высококвалифицированными научными кадрами и современной научно-исследовательской инфраструктурой, которая обеспечивает проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий Российской Федерации.

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, проводимый Комитетом по науке и высшей школе при правительстве Санкт-Петербурга. Студенты и аспиранты Университета ИТМО на протяжении девятнадцати лет принимают в нем участие.

Университет ИТМО второй год подряд демонстрирует наилучшие показатели среди вузов Санкт-Петербурга по количеству поданных и выигранных заявок. В 2019 году студентами и аспирантами Университета ИТМО было подано 572 заявки, из которых поддержано 154.

Тесная связь фундаментальных и прикладных исследований и разработок с образовательным процессом служит основой для повышения качества подготовки молодых ученых и специалистов высшей квалификации.

В сборник вошли работы студентов и аспирантов – победителей конкурса грантов 2019 года для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Представленные работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых в университете студентами и аспирантами под руководством ведущих ученых.

Проректор по научной работе, д.т.н., проф. В.О. Никифоров

**ПОБЕДИТЕЛИ КОНКУРСА ГРАНТОВ ПРАВИТЕЛЬСТВА
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА СРЕДИ СТУДЕНТОВ
УНИВЕРСИТЕТА ИТМО**



Беляева Алина Сергеевна
Факультет Прикладной оптики
E-mail: belyaevalina@inbox.ru

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ БЛЕСКА МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

А.С. Беляева

Научный руководитель – доцент Г.Э. Романова

Аннотация

В статье представлены результаты разработки опико-электронного прибора для контроля качества лакокрасочных материалов и покрытий - блескомера. Принцип работы прибора заключается в измерении отраженного от контролируемой поверхности потока. Измерение блеска проводится на трех основных углах падения светового пучка на поверхность (геометрия: 20/20, 60/60, 85/85) и на двух дополнительных (геометрия: 45/45, 75/75) в зависимости от свойств контролируемой поверхности.

Ключевые слова

Блескомер, осветительная система, контроль качества покрытий.

Цель проекта – разработка двух приборов для контроля блеска и яркости поверхности с различной геометрией. На многих производствах и предприятиях контроль блеска является обязательным. Однако на данный момент только зарубежными приборами можно производить официальный контроль качества, при этом стоимость зарубежных приборов довольно высока. Поэтому разработка отечественного прибора, сравнимого по характеристикам с зарубежными аналогами, является актуальной и важной задачей.

В методике по контролю блеска лакокрасочных покрытий указывается, что необходимо начинать с угла 60/60 градусов (для матовых поверхностей), если измеренное значение свыше 70 ед. блеска, то поверхность необходимо измерять с геометрией 20/20 (для зеркальных поверхностей), а если значение меньше 30 ед. блеска, то для поверхности необходимо применять геометрию 85/85 (для сильно матовых поверхностей, таких как бумага). Оптимально, если один прибор позволит измерять значения блеска под углами 20/60/85. Поэтому главным достоинством блескомера, содержащим три основных канала, является его универсальность. Кроме того, необходимо обеспечить компактные размеры прибора. Второй прибор должен иметь геометрию 45/0/45, то есть содержать каналы, освещающий контролируемую поверхность под углом 45 градусов и регистрировать сигнал под углом 45 и 0 градусов. Это позволит измерять поверхности со средней степенью блеска, а также измерять яркость. Погрешность измерений приборов не должна превышать ± 2 ед. блеска.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

– разработать оптическую осветительную систему, распределяющую световой поток равномерно на контролируемой поверхности, при этом световой пучок должен быть коллимированным, и сопрягающую оптическую систему для измерительного канала;

– разработать комплект документации на изготовление оптических деталей и их креплений;

– выполнить сборку макетов приборов, провести апробацию приборов на различных эталонах блеска и яркости.

Были рассмотрены разные принципиальные оптические осветительные системы, в том числе построенная по схеме Келера. В результате была рассчитана осветительная система, представленная на рис. 1а [1].

Она удовлетворяет требованиям технического задания по равномерности распределения освещенности (рис. 1 б) на контролируемой поверхности и габаритам, а также соответствует стандартам на приборы такого типа [2, 3].

Разработанная оптическая осветительная система состоит из двух плосковыпуклых линз и использует светодиод Cree XQ-E High Intensity [4].

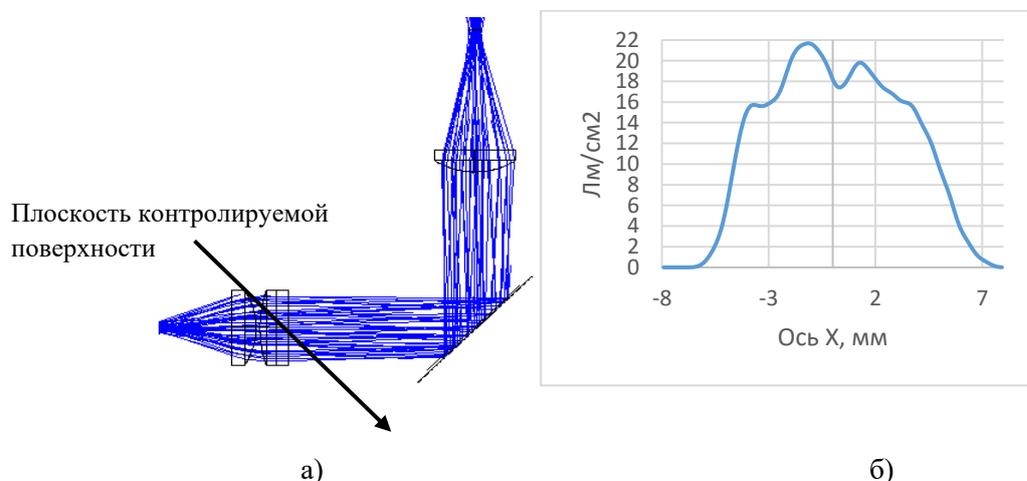


Рис. 1. Результаты математического моделирования оптической системы:
а – ход лучей в оптической системе ; б – график освещенности контролируемой поверхности

Разрабатываемый прибор унифицирован, имеет один вид оптической системы для всех каналов измерения блеска и яркости и соответствует всем российским и зарубежным стандартам (рис. 1а).

В приемном канале использована одиночная плоско-выпуклая линза, а в качестве приемника – фотодиод VTB9413ВН: диапазон чувствительности 330-720 нм, максимальная чувствительность на длине волны 580 нм [5].

Для рассчитанной системы разработан корпус, а также были смоделированы 3D модели приборов. На рисунке 2а представлена сборочная 3D модель блескомера на 2 угла (геометрия 45/0/45), на рис. 2б [6].



Рис. 2. Модель прибора:
а – 3D модель блескомера с геометрией 45/0/45 в разрезе ; б – вид готового макета прибора

Тестирование прибора происходило на 6 откалиброванных образцах блеска и трех образцах яркости с оптической системой, в которую поочередно помещали после источника диафрагмы с различными размерами отверстия. На рис. 3 приведен график зависимости значений эталонов блеска от измеренных напряжений на фотодетекторе с оптической системой без диафрагмы. Как видно из графиков, на линейность результатов влияет не только размеры диафрагм, но и геометрия измерения, так погрешность измерения для геометрии 85/85 не превышает 2 ед. блеска, благодаря чему оптическая система не нуждается в диафрагме. По результатам измерений для остальных каналов, был выбран оптимальный диаметр отверстия - 0,5 мм, при таких размерах отклонения от эталонных значений не превышают 2 ед. блеска (рис. 4).

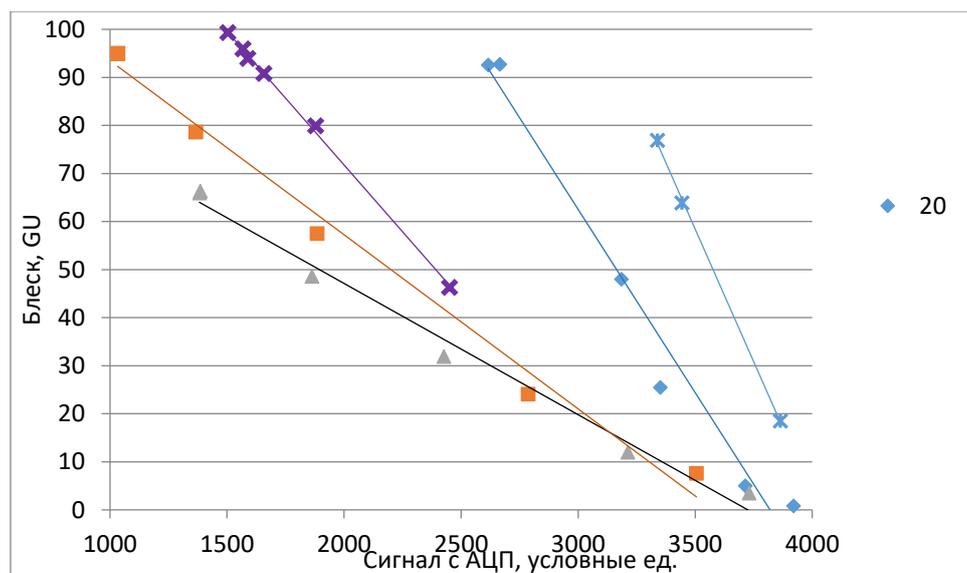


Рис. 3. Зависимость результатов значений блеска от напряжения на фотоприемнике без диафрагмы

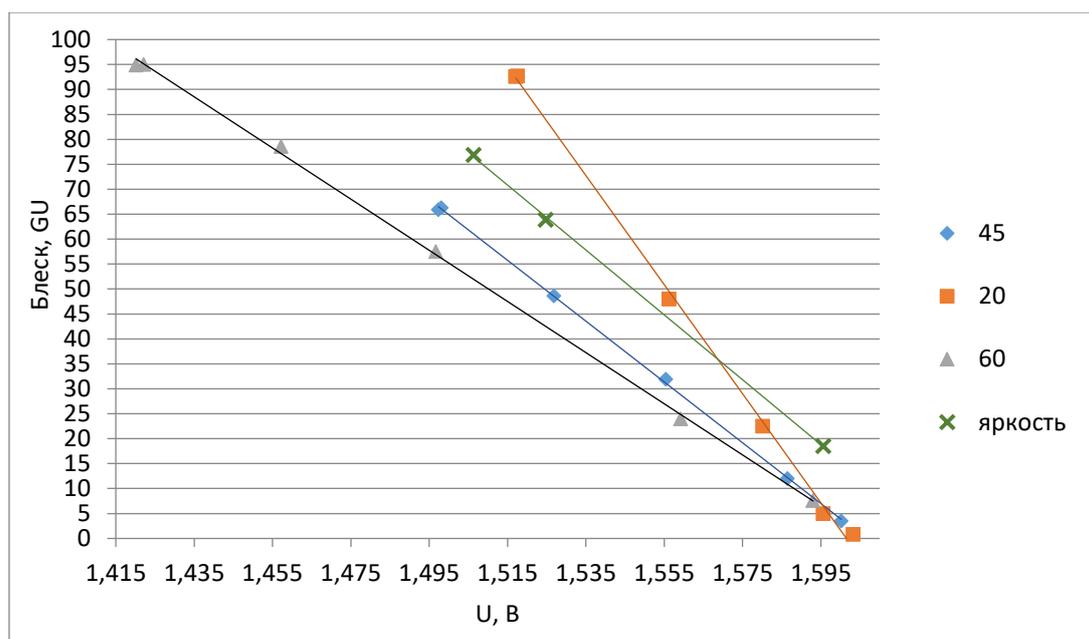


Рис. 4. Зависимость результатов значений блеска от напряжения на фотоприемнике с диафрагмой 0,5 мм

В результате проделанной работы:

- выбрана оптимальная оптическая система, удовлетворяющая требованиям стандартов и производства;
- разработан пакет документации;
- собран макет прибора;
- выбран оптимальный диаметр диафрагмы, что подтверждено путем тестирования макета прибора;
- прибор прошел апробацию на различных эталонных образцах блеска и яркости.

Литература

1. ZEMAX Optic Studio. User Manual. Version July 2018. ZEMAX LLC, 2018. 2545 p.
2. Беляева А.С. Разработка и анализ оптической осветительной системы малогабаритного блескомера // Сборник трудов VII конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 17-20апреля 2018г.). 2018. Т. 1. С. 234-237.
3. ГОСТ 31975-2017 (ISO 2813:2014). Метод определения блеска лакокрасочных покрытий под углом 20°, 60° и 85°. Введен 01.08.2014. М.: Стандартиформ, 2017. 12 с.
4. Cree XLamp XQ-E High Intensity [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-discrete/xlamp-xq-e-high-intensity> (дата обращения 04.11.2019).
5. Excelitas VTB9413BH [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tme.eu/ru/details/vtb9413bh/fotodiody/excelitas> (дата обращения 28.04.2019).
6. Беляева А.С., Романова Г.Э. Разработка и апробация макета прибора блескомера // Сборник трудов VIII конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 15-19апреля 2019г.). 2019. Т. 2. С. 44-48.



Бобе Александра Сергеевна
Факультет Прикладной оптики
E-mail: alexandrabobe@gmail.com

РАЗРАБОТКА ИК ЭНДОСКОПА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ТКАНЕЙ ПРИ МАЛОИНВАЗИВНОЙ ЛАПАРОСКОПИИ

А.С. Бобе

Научный руководитель – доцент А.О. Вознесенская

Аннотация

Электрические инструменты, используемые в малоинвазивных лапароскопических операциях, вырабатывают значительное количество энергии при направленной работе с определенными тканями для достижения различных хирургических влияний. Термические повреждения, которые не были распознаны во время операции, могут вызвать серьезные осложнения. На данный момент одна из главных задач – снижение и контролирование распространения термической энергии в соседние ткани. В работе рассматривается возможность контроля температуры в реальном времени при помощи термографического медицинского эндоскопа, измеряющего тепловое излучение тканей. В ходе расчётов был установлен спектральный диапазон работы прибора (8 – 10 мкм) и произведен обзор возможных материалов для оптических компонентов прибора, работающего в ИК спектре. Выделены материалы, имеющие наибольший коэффициент пропускания в заданном диапазоне длин волн. Выбран приемник излучения. Найдены прототипы подобных приборов и проведен габаритный и энергетический расчет устройства. Смоделирована оптическая система и проведен анализ ее качества по пятну рассеяния и функции передачи модуляции.

Ключевые слова

Инфракрасный эндоскоп, германий, расчет оптических систем, медицинская оптика, дальний ИК, лапароскопы.

Цель проекта: разработка ИК эндоскопа для контроля термографической картины тканей при операции в реальном времени.

Задачи проекта:

- обзор существующих методов контроля температуры биологических тканей;
- исследование особенностей систем, работающих в ИК диапазоне;
- расчет и моделирование ИК эндоскопа;
- анализ характеристик полученной системы.

В настоящее время существует несколько методов для контроля температур в течение лапароскопических операций, такие как применение сенсоров (термопар и др.) в непосредственной близости от оперируемой области. Среди неинвазивных методов можно выделить компьютерную и магнитно-резонансную томографию. Использование этих технологий усложняет проведение операций, требует специального оборудования [1]. На данный момент изображающие системы для теплового излучения в медицине в основном используются для мониторинга температур поверхности человеческого тела.

В работе предложено использование эндоскопа для контроля термической картины области операции в режиме реального времени. Характеристики прибора:

- длина системы: 310-345 мм;
- диаметр рабочей части 10 мм;
- угол обзора 80 градусов;
- матрица 320 x 240 пикселей;
- температурный диапазон: 20 – 100.

Для расчета спектрального диапазона прибора был использован закон смещения Вина для температурного диапазона 20° - 40°.

$$\lambda = \frac{b}{T},$$

где λ – длина волны излучения с максимальной интенсивностью, T – температура тела, b – коэффициент, $b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Тогда спектральный диапазон возможно определить, как:

$$t_1 = 20^\circ\text{C}; \quad \lambda_{max1} = \frac{b}{T} = \frac{2900_{\text{мкм}\cdot\text{К}}}{(20+273)\text{К}} = 9,9 \text{ мкм};$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}; \quad \lambda_{max2} = \frac{b}{T} = \frac{2900_{\text{мкм}\cdot\text{К}}}{(100+273)\text{К}} = 7,8 \text{ мкм};$$

$$\Delta\lambda = 7,8..9,9 \text{ мкм}.$$

Для данного диапазона не подходят материалы оптических элементов, традиционно применяющихся в эндоскопии. Был проведен сравнительный анализ материалов ИК спектра для выбора наиболее оптимального [2] (таблица).

Для медицинского прибора, работающего в диапазоне дальнего ИК подходят материалы: Ge, ZnSe, ZnS и халькогенидные стекла. В общем случае линзы из ZnS и ZnSe дороже, чем линзы из Ge. Халькогенидные стекла перспективны в использовании для эндоскопии [3]. В местах возможного контакта с тканями в статье предлагается использовать нетоксичные алмазы или фториды. В качестве основного материала оптических элементов предлагается использование германия.

Теоретическая разрешающая способность эндоскопа определяется по формуле:

$$N = \frac{2 \cdot A}{\lambda},$$

где A – числовая апертура, λ – длина волны.

Для заданных значений разрешающая способность составляет $N = 22.2 \text{ мм}^{-1}$.

Результаты моделирования

В ходе работы была рассчитана оптическая система по методу, предложенному Хацевич Т.Н. [4].

Материалы для оптических элементов в ИК спектре

Материал	Спектр пропускания, мкм	Особенности
Кристаллы:		
BaF2	0,25 – 9 мкм	
CdTe	1 – 25 мкм	Токсичный материал
CaF2	0,25 – 8 мкм	
CsBr, CsI, KCl, NaCl	0,35 – 32 мкм	Необходимо защищать от воды
GaAs	2,5 – 12 мкм	Токсичный материал
Ge	3 – 5 мкм, 8 – 12 мкм	
Al2O3 (сапфир)	0,25 – 5 мкм	
ZnSe	0,6 – 16 мкм	Используется в лазерных системах, низкая прочность
ZnS (IRC – infrared ceramics):	3 – 12 мкм	
Стекла		
Халькогенидные стекла (ИКС)	1 – 14 мкм	Множество видов обработки, можно использовать в паре с германием для коррекции хроматизма
Полимеры		
Поликарбонат, акрил	0,3 – 2 мкм	
Силикон	1,2 – 8 мкм	
Полиэтилен	1 – 7 ТГц, 8 – 14 мкм	Для ИК области производится только линзы Френеля
HDPE	8 – 14 мкм	Хорошо пропускает излучение только при малых толщинах
PTFE (Polytetrafluoroethylene)	1 – 8 мкм, 30 мкм – 1 мм	

Полученная система в тонких компонентах представлена на рис. 1.

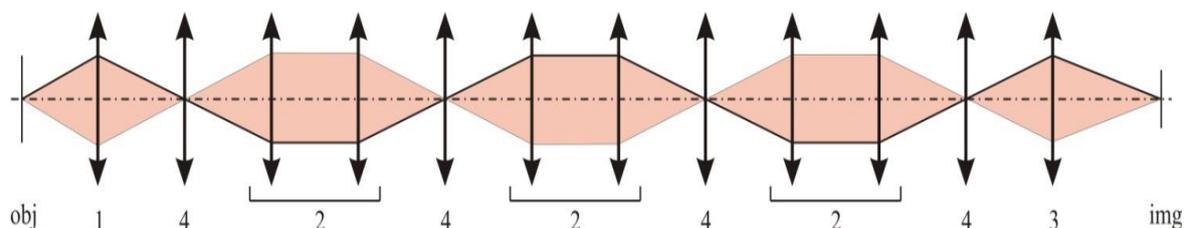


Рис. 1. Система эндоскопа в тонких компонентах, 1 – объектив, 2 – передающая система, 4 – конденсор, 3 – видеоокуляр

Качество системы оценивалось по значению частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) и размеру пятна рассеяния. Для входного зрачка 2 мм, с контрастом 0,2 передается частота в 10 лин/мм (рис. 2, 3).

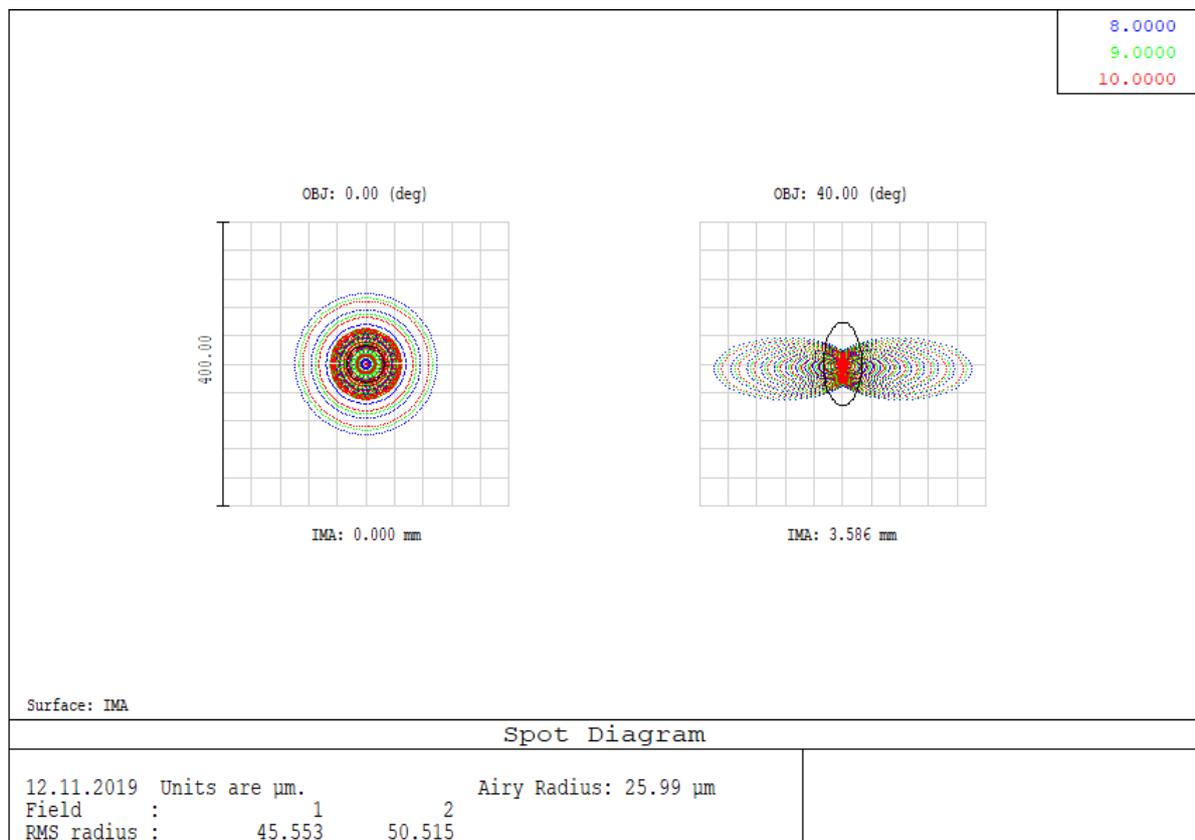


Рис. 2. Пятно рассеяния для входного зрачка диаметром 2 мм

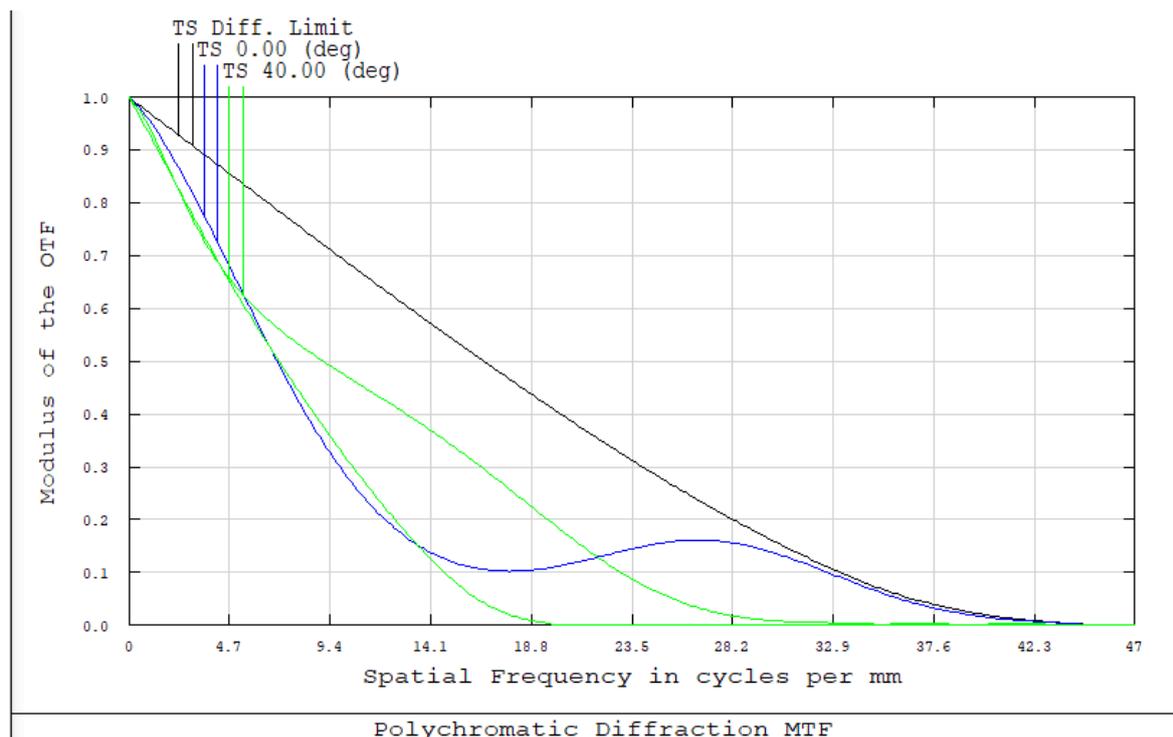


Рис. 3. График ЧКХ для входного зрачка диаметром 2 мм

В результате работы был установлен спектральный диапазон работы прибора (8 – 10 мкм) и произведен обзор возможных материалов для оптических компонентов прибора, работающего в ИК спектре. Выделены материалы, имеющие наибольший коэффициент пропускания в заданном диапазоне длин волн. Выбран приемник излучения. Найдены прототипы подобных приборов и проведен габаритный и энергетический расчет устройства. Смоделирована оптическая система и проведен анализ ее качества по пятну рассеяния и функции передачи модуляции.

В дальнейшем планируется рассмотреть другие схемы объектива, оборачивающей системы и проекционного объектива. Планируется рассмотреть систему с использованием других материалов линз (например, ZnSe). Планируется провести полный энергетический расчет системы, подбор приемника излучения.

Литература

1. Lin S., Fichera L., Fulton M.J. & Webster R.J. Don't get burned: Thermal monitoring of vessel sealing using a miniature infrared camera. *Prog. Biomed. Opt. Imaging - Proc. SPIE 10135*. (2017).
2. Optical and Infrared Materials. Available at: <http://www.iiviinfrared.com/Optical-Materials/optical-materials.html>. (Accessed: 19th January 2019).
3. Seddon A.B. A Prospective for New Mid-Infrared Medical Endoscopy Using Chalcogenide Glasses. *Int. J. Appl. Glas. Sci.* 2, 177–191 (2011).
4. Хацевич Т.Н., Михайлов И.О. Эндоскопы: Учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2002. 196 с. ISBN 5-87693-108-X. УДК 681.784.84:616-072.



Быкадоров Матвей Владимирович
Факультет Лазерной фотоники и оптоэлектроники
E-mail: 2kydepsta2@gmail.com

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В МАССИВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПОСРЕДСТВОМ ДВУСТОРОННЕГО АМПЛИТУДНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

М.В. Быкадоров

Научный руководитель – старший научный сотрудник М.Ю. Плотников

Аннотация

Статья посвящена разработке метода подавления шумов в массиве волоконно-оптических интерферометрических датчиков. Данный метод основан на двустороннем ограничении амплитуды интерференционного сигнала, с целью увеличения отношения сигнал/шум в выходном сигнале. С использованием математического моделирования и экспериментальных исследований показано, что выбор уровня ограничения амплитуды интерференционных сигналов оказывает значительное влияние на эффективность шумоподавления. Результаты математического моделирования показали, что способ ограничения амплитуды показал высокий уровень подавления аддитивных шумов до 15%, а по результатам работы с реальным сигналом массива волоконно-оптических датчиков уровень собственных шумов был снижен до 12%.

Ключевые слова

Волоконно-оптический датчик, уровень собственных шумов, двустороннее ограничение амплитуды, шумоподавление.

Введение

Волоконно-оптические датчики продолжают совершенствоваться в части точности и эксплуатационных характеристик, и находят все большее применение в различных областях науки и техники. Повышение точностных характеристик связано с понижением уровня шума сигнала волоконно-оптического датчика. Данная работа направлена на исследование и моделирование метода подавления аддитивных шумов.

На рис. 1 представлен интерференционный фазово-модулированный сигнал, пришедший на блок двустороннего амплитудного ограничителя. По оси абсцисс откладывается время в секундах, по оси ординат разрядность сетки аналогово-цифрового преобразователя (размах интерференционной картины). Как известно, частотная модуляция всегда сопровождается незначительной остаточной амплитудной модуляцией, что выражается в виде колебаний амплитуды. Кроме того, поскольку аддитивные шумы частично проявляются в изменении амплитуды модулированного сигнала, а информационная составляющая содержится в изменениях частоты, то допускается устранение нежелательных колебаний амплитуды с помощью ограничения амплитуды сигнала. В блоке обработки сигналов нежелательная амплитудная модуляция и шум демодулируются вместе с сигналом и приводят к искажению восстанавливаемого информационного сигнала [1].

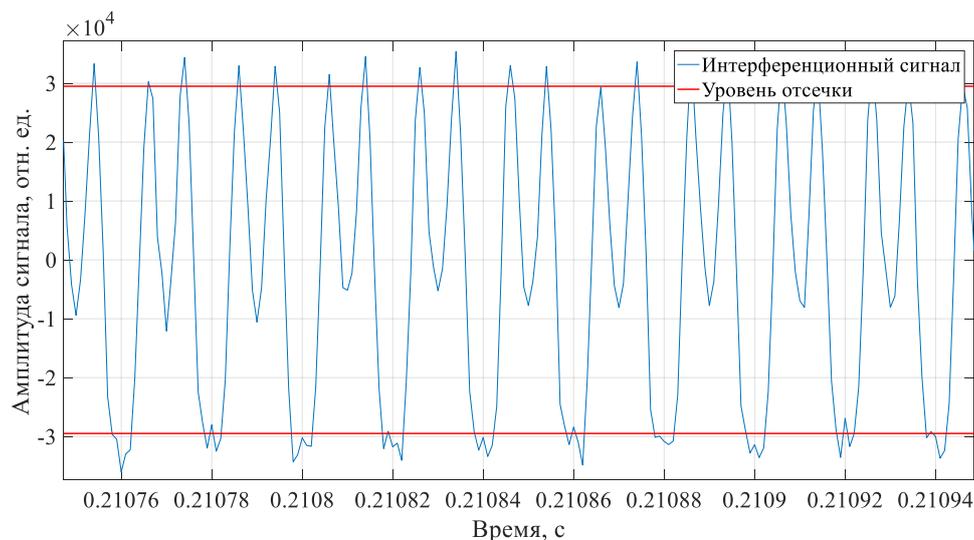


Рис. 1. Интерференционный сигнал на входе амплитудного ограничителя

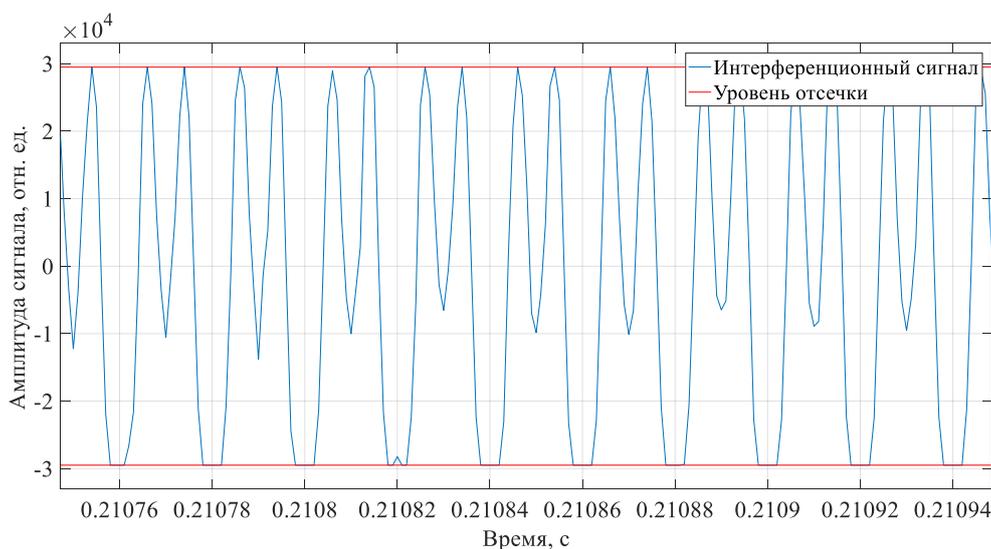


Рис. 2. Интерференционный сигнал на выходе амплитудного ограничителя

Частотная модуляция всегда сопровождается незначительной остаточной амплитудной модуляцией, что выражается в виде колебаний амплитуды. Кроме того, поскольку аддитивные шумы частично проявляются в изменении амплитуды модулированного сигнала, а информационная составляющая содержится в изменениях частоты, то допускается устранение нежелательных колебаний амплитуды с помощью ограничения амплитуды сигнала. В блоке обработки сигналов нежелательная амплитудная модуляция и шум демодулируются вместе с сигналом и приводят к искажению восстанавливаемого информационного сигнала [1].

Сам же ограничитель представляет блок в схеме демодуляции, который создает выходной сигнал с постоянной амплитудой для всех сигналов на входе, превышающих заданный минимальный входной уровень, который часто называют пороговым уровнем, уровень подавления шумов или уровень отсечки. Сигнал после прохождения блока амплитудного ограничителя показан на рис. 2.

С помощью ограничителя амплитуды можно добиться лучшего соотношения сигнал/шум, но при этом должно соблюдаться несколько условий:

1. Соотношения сигнал/шум детектируемого сигнала должно быть больше 10 дБ или более.
2. Сигнал должен иметь индекс модуляции, равный или больше единицы.
3. Сигнал ограничителя должен иметь достаточно высокую степень подавления.

Математическое моделирование предложенного метода

На рис. 3, 5, 7 представлены графики зависимости выходных шумов (шумы на частоте 500 Гц в рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$) от входных шумов в относительных единицах в разрядной сетке аналогово-цифрового преобразователя (Адд. шум отн. ед.) и от амплитуды интерференционного сигнала в относительных единицах в разрядной сетке аналогово-цифрового преобразователя (Амплитуда сигнала отн. ед.). В первом случае амплитуда сигнала не ограничивалась и, соответственно, получилась зависимость выходных шумов от входных шумов. Для второго случая, напротив, в соответствии с предлагаемым методом двустороннего амплитудного ограничения амплитуда сигнала ограничивалась, и зависимость выходных шумов от входных шумов стала нелинейной.

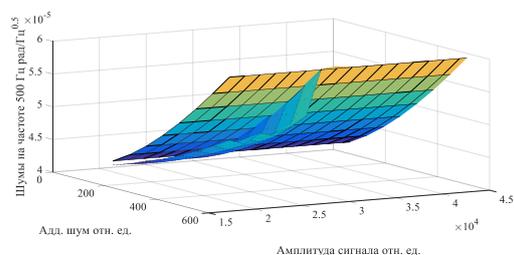


Рис. 3. Шумы после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него, рабочая точка = 0

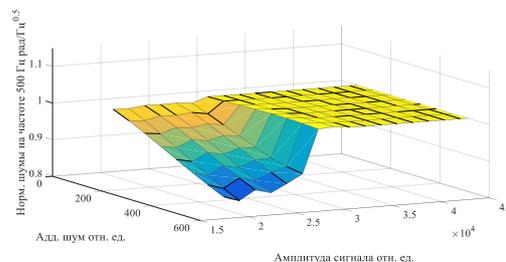


Рис. 4. Нормированный график шумов после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него, рабочая точка = 0

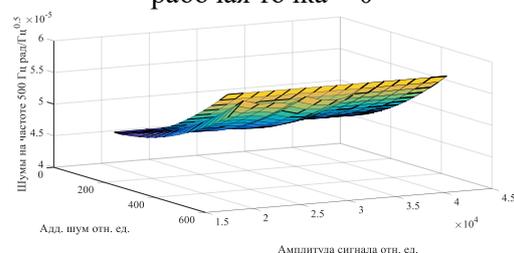


Рис. 5. Шумы после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него, рабочая точка = $\frac{\pi}{2}$

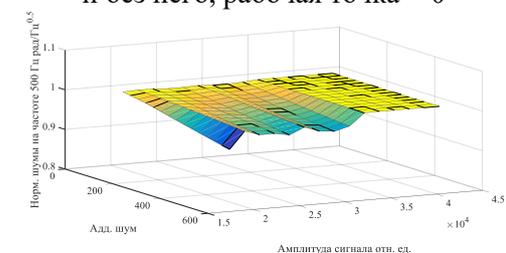


Рис. 6. Нормированный график шумов после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него, рабочая точка = $\frac{\pi}{2}$

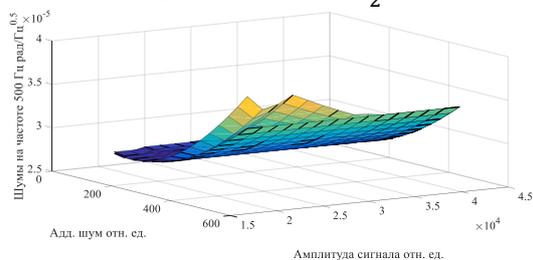


Рис. 7. Шумы после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него, рабочая точка = $\frac{\pi}{4}$

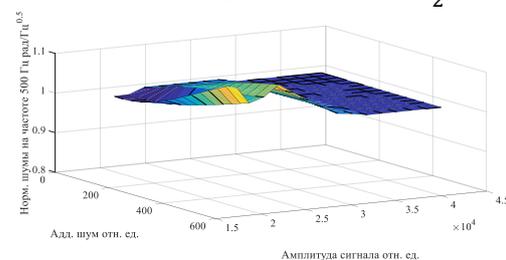


Рис. 8. Нормированный график шумов после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него, рабочая точка = $\frac{\pi}{4}$

На рис. 4, 6, 8 изображен нормированный график, где плоскость с ограничением амплитуды нормирована на плоскость без ограничения амплитуды интерференционного

сигнала для лучшей наглядности. Все математические преобразования исследуемого метода и алгоритма демодуляции были описаны с использованием скриптового языка среды Matlab. В данных примерах к интерференционному сигналу добавлялся аддитивный шум, при этом сохранялось отношение сигнал/шум 10 дБ или более.

Уровень отсечки (ограничения амплитуды) менялся $0.6 \cdot V$ до $1.3 \cdot V$, где V максимально число разрядной сетки АЦП (32767). На рисунках представлены графики для разных рабочих точек (0 , $\pi/2$, $\pi/4$) интерферометра. По итогам проведенного моделирования способ ограничения амплитуды показал высокий уровень подавления аддитивных шумов до 15% при рабочей точке равной 0 . В случае, когда рабочая точка равна $\pi/4$, шумы выросли на 1-4%, а в случае $\pi/2$ снизились на 1-4%.

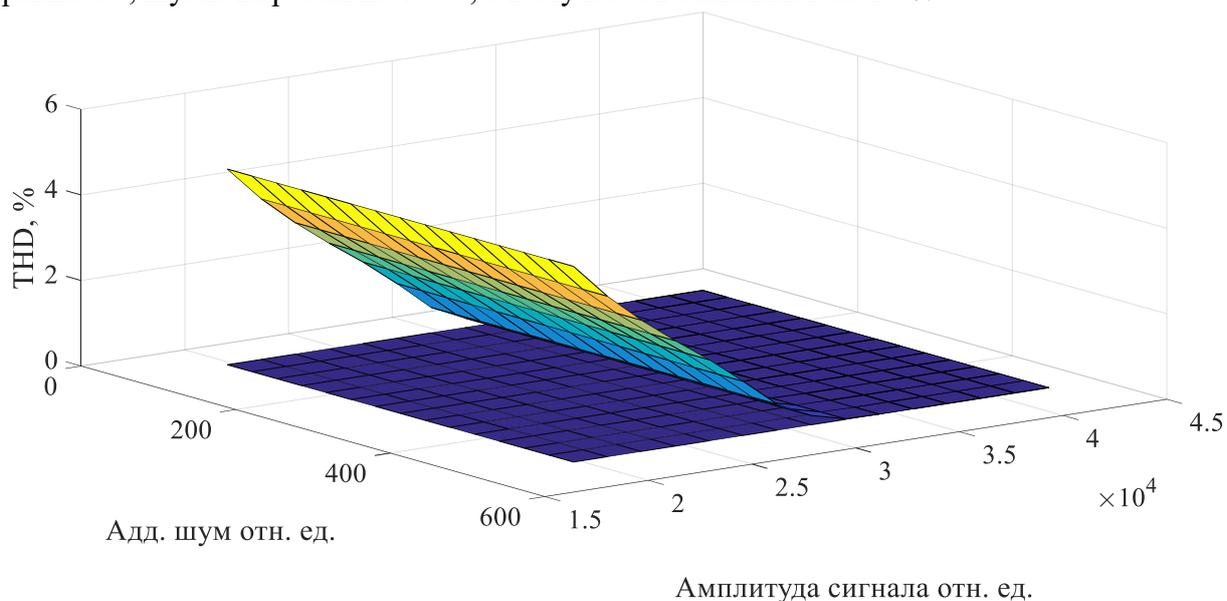


Рис. 9. Коэффициент нелинейных искажений после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него

Кроме того, было промоделировано влияние ограничения амплитуды на нелинейные искажения выходного сигнала (рис. 9). Для оценки использовался коэффициент нелинейных искажений (total harmonic distortion, THD). Для всех рабочих точек (0 , $\pi/2$, $\pi/4$) интерферометра графики совпали. Нижний (синий) график это демодуляция без ограничения амплитуды, в этом случае амплитуда интерференционного сигнала не менялась, увеличивались только аддитивные шумы, коэффициент нелинейных искажений не изменился. Верхний (цветной) это демодуляция с ограничением амплитуды, амплитуда интерференционного сигнала уменьшалась, из-за чего нелинейные искажения увеличивались независимо от уровня шума. Но, во всех состояниях рабочей точки (0 , $\pi/2$, $\pi/4$) растет коэффициент нелинейных искажений с увеличением уровня отсечки.

Экспериментальное исследование

Для исследования эффективности подавления шумов с помощью ограничителя амплитуды, был записан фазово-модулированный сигнал с волоконно-оптического интерферометрического датчика с АЦП. Далее этот сигнал был демодулирован в Matlab с помощью схемы демодуляции на основе вычисления значения функции арктангенса [2-3].

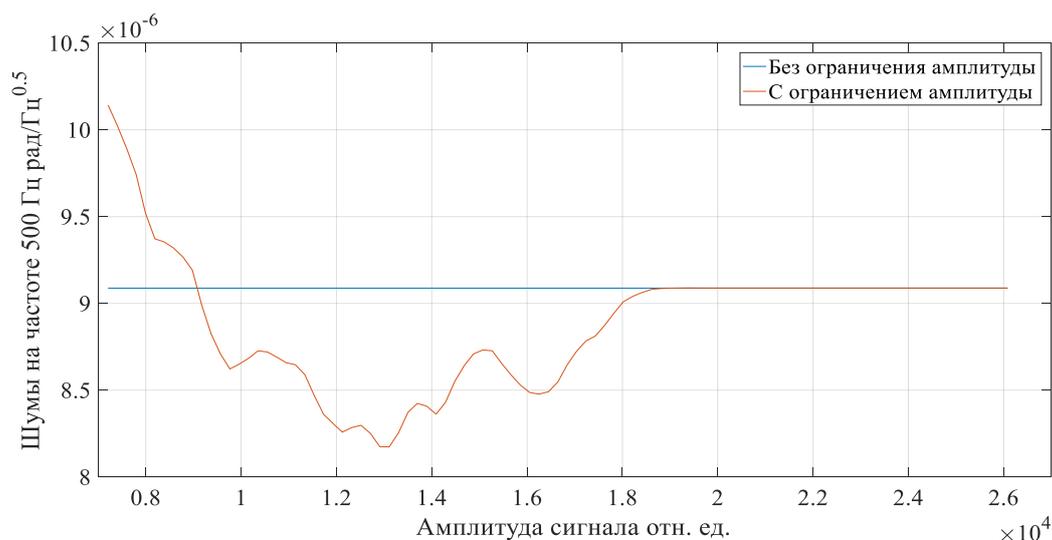


Рис. 10. Шумы после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него

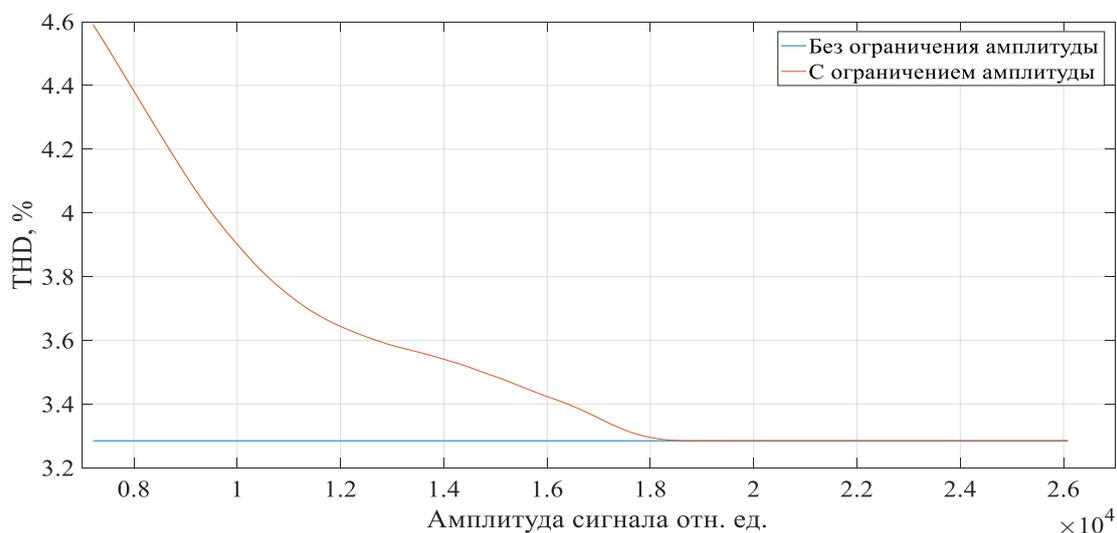


Рис. 11. Коэффициент нелинейных искажений после демодуляции с амплитудным ограничителем и без него

На рис. 10 и 11 приведены сравнения результатов обработки интерферометрического сигнала с блоком ограничения амплитуды и без него.

Полученные практические результаты соответствуют математическому моделированию. Из графиков видно, что можно выбрать оптимальную рабочую область от 1,9 отн. ед. до 0,9 отн. ед., при которой шумы сигнала волоконно-оптического датчика будут снижены, при этом гармонические искажения вырастут несущественно с 3,3% до 4,1%.

Основные результаты

В результате работы был разработан программный метод по повышению эксплуатационных характеристик волоконно-оптических интерферометрических датчиков со вспомогательной фазовой модуляцией. Исходя из полученных данных, метод двустороннего амплитудного ограничения имеет высокую эффективность подавления аддитивных шумов, но при этом влияет на нелинейные искажения сигнала. Однако возможно найти оптимум, при котором влияние на коэффициент нелинейных

искажений данного метода будет минимальным при максимальной эффективности подавления аддитивных шумов.

Было осуществлено моделирование и экспериментальное исследование разработанного программного метода. По результатам математического моделирования уровень собственных шумов снизился на величину до 15%. По результатам эксперимента уровень шумов в рабочей области снизился от 1% до 12%, при этом коэффициент нелинейных искажений незначительно увеличился с 3,3% до 4,1%.

Литература

1. Томаси У. Электронные системы связи. Litres. 2017.
2. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S., "Fiber Optic Sensors, 2nd ed. Pennsylvania State University," CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
3. Liwei Wang, Min Zhang, Xianhui Mao, Yanbiao Liao, "The Arctangent Approach of Digital PGC Demodulation for Optic Interferometric Sensors," Proc. of SPIE Vol. 6292, 62921E, (2006).



Воробьева Алена Александровна
Факультет Технологического менеджмента и инноваций
E-mail: alenka-vorobeva@mail.ru

EVENT-МАРКЕТИНГ КАК СРЕДСТВО ПОПУЛЯРИЗАЦИИ НАУКИ В ОБЩЕСТВЕ

А.А. Воробьева

Научный руководитель – доцент Д.В. Соловьева

Аннотация

Работа посвящена разработке метода организации инновационных event-проектов, популяризирующих науку. Проводится исследование и уточнение понятийного аппарата в области инновационных event-проектов, изучены существующие методы организации событий данного типа, а также разработан авторский комплексный метод организации мероприятия, основанный в первую очередь на маркетинговой стратегии, включающий в себя семь основных этапов и являющийся циклическим. Также представлена апробация отдельных этапов на научно-популярном мероприятии Pint of Science.

Ключевые слова

Event-проект, event-маркетинг, инновационное мероприятие, научно-популярный event-проект, популяризация науки.

Цель проекта – изучить специфику инновационных event-проектов, популяризирующих науку и существующие методики по организации мероприятий, разработать авторский метод организации события и апробировать его.

Задачи проекта:

- развить понятийный аппарат и изучить особенности инновационных event-проектов;
- исследовать существующие методы разработки event-проектов;
- разработать собственный метод организации event-проекта, популяризирующего науку;
- исследовать рынок инновационных event-проектов, популяризирующих науку г. Санкт-Петербург;
- апробировать отдельные модели разработки мероприятия в рамках общего метода.

Тема популяризации науки сегодня является особо актуальной, государство, общественные организации, образовательные учреждения и бизнес-субъекты занимаются продвижением науки и ее ценностей среди общества. Event-маркетинг является одним из эффективнейших инструментов по популяризации науки: донесение ценностей и вовлечение в совместную деятельность для повышения лояльности к объекту мероприятия, то есть к самой науке; создание прочной эмоциональной связи с целевой аудиторией и объединение нескольких целевых групп на одной площадке. Российская практика показывает скептическое отношение к event-маркетингу, как способу популяризации науки. Это связано с тем, что большая часть мероприятий носит более академический характер, представленные форматы устарели, не соответствуют потребительским запросам, а продвижение направлено на очень узкую категорию лиц.

Если смотреть на проблему более комплексно, то отсутствует четкая методика или алгоритм по организации научно-популярных event-проектов.

Необходимо использовать системный подход для определения понятия «event-маркетинг», так как данное понятие многогранно и включает в себя несколько составляющих:

- событийный маркетинг, как способ продвижения и инструмент коммуникации (рассматривается Американской Маркетинговой Ассоциацией);
- событийный маркетинг, как способ управления событием или event-проектом (рассматривается Д. Тассиополосом, Г. Дамстером);
- событийный маркетинг, как концепция взаимоотношений (рассматривается К. Гренроосом, О.А. Третьяк);
- событийный маркетинг, как сфера услуг (А. Назимко).

Формулируя определение термина «инновационный проект» многие авторы говорят о том, что это комплекс, а не единичное мероприятие (Федеральный закон от 23.08.1996 N 127-ФЗ (ред. от 03.12.2012) «О науке и государственной научно-технической политике», В.В. Быковский, В.В. Платонов), другие делают акцент на том, что это обязательно новая идея, технология или итоговый продукт, лежащие в основе инновационного проекта (ГОСТ Р 54147-2010: Стратегический и инновационный менеджмент, Е.С. Мищенко, С.Д. Ильенкова С.Д., С.Ю. Ягудин, В.В. Гужов), также особый акцент делается на обязательном итоговом экономическом эффекте (М.В. Карлей, И.А. Султанов, Федеральный закон от 23.08.1996 N 127-ФЗ (ред. от 03.12.2012) «О науке и государственной научно-технической политике»).

Таким образом, с учетом проведенного анализа терминов и выявления их ключевых характеристик, мы сформировали авторское определение. В данной работе под инновационным event-проектом, популяризирующем науку мы будем понимать уникальное событие, состоящее из комплекса мероприятий, основанных на создании новой event-технологии, организуемые для формирования лояльного отношения к науке, научному сообществу и иницирующие коммуникацию между наукой и обществом.

Существующие методы организационно-популярных event-проектов

Разработкой алгоритмов и методов организации event-проекта с научной точки зрения занимается достаточно малое количество авторов. Большинство специалистов – практики, которые дают скорее советы и рассказывают о тактических приемах, нежели о построении комплексной стратегии.

Например, В. Морозов и А. Парабеллум в своей книге «Мероприятие на миллион (Быстрые деньги на чужих знаниях)» рассматривают 5 этапов организации мероприятия на примере проведения тренинга с нанятым спикером: создание продукта, продвижение, продажи, организация на месте и постпиар [1]. Событие рассматривается авторами скорее, как единичный продукт, а не комплекс мероприятий, имеющий циклический жизненный цикл.

Практики событийного маркетинга Д. Румянцев и Н. Франкель в своей книге «Event-маркетинг предлагают схожую 4-х шаговую модель организации мероприятия: подготовка к событию, продвижение события, проведения события, после события. Авторы делают акцент на продвижение события и, в отличие от В. Морозова и А. Парабеллума соединяют этапы продвижение и продажи в один [2]. В данном труде, как и в предыдущем отсутствует анализ рынка и изучение потребительских предпочтений. Это этапы, которые помогают избежать не востребованных для целевой аудитории мероприятий или сделать дубликат уже существующего проекта.

С. Лемер раскрывает жизненный цикл event-проекта через призму субъектов и объектов, с которыми работает менеджер мероприятий [3]: команда, обслуживающий

персонал, поставщики, финансы и налоги, оборудование и ресурсы, тендеры. Данное исследование интересно тем, что описывает структуру event-процессов и ключевых его участников.

А. Шумович в своей книге «Великолепные мероприятия. Технологии и практика event management» также рассматривает события через призму event-менеджмента, однако, предлагаемый алгоритм имеет научные основания и раскрывает процесс организации мероприятий более комплексно [4]. Важной особенностью алгоритма, представленного А. Шумовича, является рассмотрение event-проекта, с точки зрения цикличности. Мероприятие не заканчивается, последний этап плавно перетекает в первый и так происходит смена циклов и развитие мероприятия. Описанная методика организации event-проектов несмотря на значительную долю практических советов и тактических приемов имеет стратегическую основу и близка к первичной «классической» модели организации event-проекта, представленной Дж. Голдблаттом.

О формировании стратегии в процессе разработки мероприятия говорится в Reference model, представленной О. Томасом, Б. Хермесом и П. Лоосом.

Данный метод более комплексный и детализированный, по сравнению с вышеизложенными, каждый этап представлен отдельной моделью или, как ее называют авторы - фреймворком, которые описывают необходимые шаги и сопутствующие им бизнес-процессы. Данная модель рассмотрена также в рамках event-менеджмента и интересна с точки зрения согласования процессов и выявления их фреймворков и взаимосвязей, по типу модели это шаблон, некая заготовка, которую можно использовать при организации мероприятия. Однако, представленный метод не является цикличным, а значит рассматривает event как продукт, который имеет конкретный срок действия (начало и конец).

В рамках проведенного исследования существующих методов и алгоритмов создания мероприятий нами были выявлены некоторые особенности организации event-проекта, популяризирующего науку, которые в дальнейшем используются в авторском методе:

- перед началом организации необходимо определить цель создания event-проекта, при этом цель должна быть конкретной, определенной по времени, а также содержать ключевые показатели эффективности, по которым потом можно подвести итоги мероприятия;

- наиболее эффективным является событие, которое отвечает требованиям трендов, имеет конкурентные преимущества, а также удовлетворяет потребности целевой аудитории, поэтому необходимо проводить исследование рынка и потребителей;

- event-проект – это не единичный продукт, это комплекс мероприятий, его жизненный цикл не заканчивается окончанием мероприятия, в связи с чем наиболее оптимально использовать цикличные методы организации события;

- изначально необходимо делать акцент на стратегию, а не тактические действия;

- продвижение – это важный этап в процессе организации события, особенно если мероприятие платное, в связи с чем необходимо отдельно выделять данный этап результатом которого станет разработка комплексной стратегии продвижения

- необходимо, чтобы управленческая составляющая организации event-проекта сочеталась с маркетинговой стратегией.

С учетом вышеизложенных выводов нами был разработан авторский метод создания мероприятия, популяризирующего науку, который включает в себя 7 этапов.

Этап 1 – Целеполагание. Определяются цели мероприятия (SMART, система Г. Архангельского, карта целей (Mind Map) и ставятся ключевые показатели

эффективности (KPI результата, KPI затрат, KPI функционирования, KPI производительности, KPI эффективности).

Этап 2 – Исследование. На данном этапе проводится исследование внутренней среды организации/компании/проекта (OCAI, Методика определение ценностей компании по Шварцу), исследование трендов (глобальных и рыночных). После этого исследование рынка, где изучается текущая рыночная ситуация, составляется прогноз развитие рынка, проводится анализ конкурентного окружения, а также бенчмаркинг (Модель 5 конкурентных сил М. Портера, карта позиционирования, Метода шкалирования (SPSS Statistics). Важной составляющей этапа является исследование потребителей и их предпочтений (глубинные интервью, массовый опрос, фокус-группы, Метод Кано).

Этап 3 – Разработка. Первоначально необходимо разработать концепцию мероприятия, которая соединит дальше единой линией все используемые методы, инструменты и тактические приемы. Концепция является важным стратегическим инструментом, который обеспечивается комплексность и согласованность события. После этого происходит тематическое наполнение, где важно опираться на выявленные тренды, конкурентные предложения и потребности целевой аудитории, чтобы разработать действительно уникальное мероприятие, которые сможет донести ценности науки и сформировать лояльное отношение к ней. Следующий шаг – выбор формата. Как показало исследование формат является одним из важнейших факторов для потребителя при принятии решения о посещении мероприятия. В качестве наиболее востребованных форматов научно-популярных мероприятий мы предлагаем: научная вечеринка, научный фестиваль, зона науки на мультимедийном фестивале, научное кафе, дебаты, викторины, научно-популярное кино. И только после этого можно переходить к разработке сценария.

Этап 4 – Продвижение мероприятия (разработка стратегии продвижения). Первоначально, разрабатывается бренд мероприятия на основе проведенных исследований, формируется бренд-платформа (инсайт, эмоциональные и рациональные преимущества, ценности бренда, архетип бренда, визуальный и вербальный стиль, причины верить бренду, конкурентные преимущества, позиционирование). Далее выбираются каналы и инструменты коммуникаций. Здесь важно помнить о том, что коммуникация должна быть омниканальной, то есть все каналы должны быть выстроены в единую логическую систему, чтобы потребитель был заинтересован в коммуникации, а не страдал от информационного шума. Далее прописываются и структурируются все каналы по времени, месту и продолжительности – медиаплан, который будет реализовываться с этапа продвижения до заключительного этапа.

Этап 5 – Организация мероприятия. Классический этап, включающий: pre-event (работа с подрядчиками, волонтерами, монтаж, детальная проработка сценария), event (координация на месте, контроль и проведение мероприятия) и post-event (подведение итогов в медиа-пространстве, сбор обратной связи, установка долгосрочного контакта с посетителями).

Этап 6 – Оценка результатов мероприятия. Первоначально необходимо оценить мероприятие по ранее поставленным KPI. Далее, если мероприятие носило не только научно-популярный, но и, коммерческий характер оценивается финансовая эффективность мероприятия – ROI (расчет уровня окупаемости инвестиций). После этого оценивается имиджевая эффективность, это достаточно сложный и масштабный процесс, его можно провести с помощью таких инструментов, как оценка медиа-охвата, сбор обратной связи у посетителей, а также использования высокотехнологических инструментов, например, электронная система EventBit, или Sensum. Завершающим

подэтапом станет рефлексия по мероприятию для выявления сильных и слабых мест, а также обсуждения развития мероприятия и возможных угроз.

Этап 7 – Составление плана изменений относительно следующего события. Данный этап необходим для того, чтобы внести корректировки в последующие мероприятия, учесть ошибки и использовать сильные стороны. Как было уже сказано ранее, процесс организации мероприятия цикличен, а это значит, что 7 этап не является завершающим, а является лишь контрольной точки, далее снова следует первый этап.

Таким образом, резюмируя данный подход, мы изучили слабые стороны уже существующих методов и алгоритмов организации мероприятий, в том числе научно-популярных. В авторском методе делается акцент на отличие, выраженном в рассмотрении организации научно-популярного мероприятия, как циклического процесса, что означает постоянную корректировку и улучшение событий. Также авторский метод разработан с точки зрения маркетинга событий, а не только менеджмента событий, что показывает всю комплексность процесса организации мероприятия и стратегическую направленность.

Для апробирования отдельных этапов в рамках общей методики организации мероприятия мы провели исследование рынка научно-популярных мероприятий г. Санкт-Петербурга. Основные выводы:

1. Ключевыми трендами, влияющими на рынок являются: активная популяризация науки разными субъектами общества; интерес преимущественно к «популярным» отраслям науки (нанотехнологии, космос, медицина, психология), Lifelong learning (пер. с англ. процесс обучения в течение всей жизни); edutainment-маркетинг (совмещение образования и развлечений), нарративность.

2. Наиболее важные свойства научно-популярного мероприятия для потребителя: новаторское, объединяющее, развлекательное, интерактивное, развивающее.

3. Форматы мероприятий, соответствующие наиболее привлекательным свойствам мероприятий со стороны потребителей: научная вечеринка (Science Party), зона науки в рамках многотематического фестиваля (VK Fest, Старкон), научный фестиваль (Nauka 0+, Geek Picnic, Pop up Science, Science Fest) и научное кафе (Pint of Science).

4. Главные сегменты целевой аудитории научно-популярных мероприятий: специалисты (профессионалы в определенной отрасли), гики (любители науки, ученые), умники (интеллектуалы, предпочитающие умный досуг), любознательные (интересуются всем новым и необычным).

Далее была изучена корпоративная культура проекта Pint of Science на основе Метода определения ценностей по Шварцу и модели OSAI, в результате чего выделены стержневые свойства, на основе которых была разработана бренд-платформа мероприятия. Ключевой инсайт, который потом был заложен в стратегию продвижения: «Я хочу просвещаться, но идти в библиотеку слишком скучно, а на научные конференции слишком сложно, поэтому я выбираю мероприятия, где говорят о науке легко и понятно и где я могу провести досуг в компании своих друзей весело, но при этом интеллектуально». Также была разработана авторская модель выбора инструментов продвижения научно-популярного мероприятия на основе модели потребительского принятия решения о приобретении услуги, которая была адаптирована под Pint of Science.

Модель состоит из семи основных этапов потребительских решений о приобретении услуги (осознание потребности, поиск информации, оценка вариантов, покупка билетов, время перед мероприятием, посещение мероприятия, реакция на

мероприятие). Относительно каждого этапа была прописана цель и подобраны наиболее оптимальные инструменты продвижения.

Результаты проекта

1. Был развит понятийный аппарат, дано авторское определение «инновационный event-проект, популяризирующий науку», который был описан с точки зрения синергии понятий «инновационный проект» и «event-проект» через призму популяризации науки.

2. Были исследованы существующие методы организации event-проектов, а также выявлены их сильные и слабые стороны для последующей корректировки в процессе создания авторского метода.

3. Был разработан комплексный циклический авторский метод организации инновационного event-проекта, популяризирующего науку, основанный на разработке стратегии мероприятия, учета влияния рынка и потребительских предпочтений, а также на выделении отдельно этапа продвижения, как неотъемлемой части мероприятия.

4. Было произведено исследование рынка научно-популярных мероприятий Санкт-Петербурга, определены ключевые тренды, выявлены основные игроки, а также рассмотрены типичные потребители и возможные каналы коммуникации с ними в онлайн -и офлайн-среде.

5. Часть авторского метода организации научно-популярного мероприятия была успешно апробирована на мероприятие Pint of Science.

Литература

1. Парабеллум А., Морозов В. Мероприятие на миллион. Быстрые деньги на чужих знаниях. СПб.: Питер. 2013. 127 с.
2. Франкель Н., Румянцев Д. Event-маркетинг. Все об организации и продвижении событий. СПб.: Питер. 2017. 738 с.
3. Лемер С. Искусство организации мероприятий: стоит только начать! Ростов-на-Дону. 2016. 277 с.
4. Шумович А. Великолепные мероприятия. Технологии и практика event-management. М.: Манн, Иванов и Фербер. 2006. 336 с.



Гайош Александр Иванович
Факультет Программной инженерии и компьютерной техники
E-mail: alexander.gaiosh@gmail.com

МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЯ ЦЕЛЕВОГО АЛГОРИТМА НА УЗЛЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А.И. Гайош

Научный руководитель – доцент А.В. Пенской

Аннотация

Во встроенных вычислительных системах со значительными ограничениями по производительности, времени реакции и энергопотреблению широкое распространение получили проблемно-ориентированные вычислители. Одним из проектов, направленных на разработку системы проектирования семейства подобных вычислителей, является вычислительная платформа реального времени NITTA, включающая оригинальную аппаратную архитектуру и САПР. В статье приводится описание гибридной архитектуры TTA/NISC и рассматривается метод синтеза вычислительной платформы NITTA на базе имитационной модели целевого вычислителя.

Ключевые слова

Встраиваемые системы, высокоуровневый синтез, вычислительная платформа NITTA, имитационная модель, вычислительный процесс.

Цель проекта – описание гибридной архитектуры TTA/NISC, реализованной на ее основе САПР реконфигурируемой вычислительной платформы NITTA, описание структур и моделей отображения целевого вычислительного процесса.

Задачи:

- рассмотреть аспекты проектирования проблемно-ориентированных вычислителей;
- описать составные компоненты гибридной TTA/NISC архитектуры;
- определить структуры данных для представления процесса синтеза САПР NITTA;
- привести критерии оценки состояния имитационной модели целевой системы.

Специализированные вычислители используются в задачах, когда требуется жесткое реальное время, возможность реконфигурирования целевой системы, предъявляются строгие требования к энергопотреблению. Процессора общего назначения зачастую не могут выполнять эти требования. Наиболее широкое распространение получил подход, в рамках которого проектируют вычислитель, полностью оптимизированный под решение определенной задачи [1].

Один из путей создания таких вычислителей – проектирование ASIP (Application-Specific Instruction-Set Processor, проблемно-ориентированный процессор). Они находятся в компромиссном положении между ASIC (Application-Specific Integrated Circuit, интегральная схема специального назначения) и GPC (General purpose controller,

вычислитель общего назначения). ASIP интересны в реконфигурируемых вариантах, где конфигурируемость можно раскрыть в виде двух аспектов:

- перепрограммируемость, которая присутствует у всех ASIP и это является их главным отличием от ASIC;
- возможность перестроить вычислитель таким образом, чтобы он был ориентирован в иные области задачи путем замены избыточных вычислительных блоков на специализированные.

Одной из наиболее интересных вычислительных архитектур, которые позволяют строить ASIP является NISC (NISC – No Instruction Set Computer, вычислитель без системы команд). Ее интерес заключается в том, что она использует низкоуровневый нанокод, который может генерироваться для каждого такта процессорного времени и дает возможность управлять каждым сигналом процессора. Это позволяет описывать вычислители сколь угодно сложного поведения путем на разных уровнях абстракций управляющего кода.

Как правило, NISC имеет классическую Фон-Неймовскую архитектуру, что подразумевает наличие регистровый файл и накладные расходы на работу с памятью, кроме того, NISC недостаточно эффективно использует параллелизм.

Существует достаточно большое количество альтернативных архитектур, как например архитектура TTA (Transport Triggered Architecture, архитектура, ориентированная на пересылку данных). К ее плюсам можно отнести то, что она обладает высоким уровнем параллелизма и минимизирует количество пересылок данных, потому что исполнимое устройство напрямую используется в системе в качестве вычислительного блока.

В рамках создания ASIP процессора можно выделить два акцента: на которые мы ставим при решении данной проблемы:

- низкоуровневость и compile-time планирование, что гарантирует соблюдение жесткого реального времени;
- сложные вычислительные блоки – обеспечивают высокую гибкость системы, что позволит в дальнейшем организовать реконфигурацию вычислителя, а также снизить энергопотребление за счет уменьшения площади процессора [2].

Одним из инструментов, направленных на проектирование вычислителей с упором на описанные аспекты, является вычислительная платформа NITTA. В ее основе лежит оригинальная архитектура вычислительная архитектура NISC/TTA, представляющая из себя синтез архитектур TTA и NISC.

Архитектура NISC описывает систему с точки зрения того, как построить систему управления целевым вычислителем и его вычислительными блоками. Архитектура TTA задает унифицированную модель для всех компонентов целевого процессора как пересылку данных между вычислительными блоками, т.е. описывает целевой вычислительный процесс.

Таким образом, NITTA-процессор разбивается на две части, управляющий нанокод и аппаратную часть, включающую в себя некоторую коммуникационную среду с определенной топологией и вычислительные блоки, которые, могут иметь сколь угодно сложное поведение [3].

Любой вычислительный алгоритм, выполняемый на таком процессоре, может быть представлен последовательностью пересылок данных между вычислительными блоками, что наглядно можно отобразить в виде графа передачи данных (DFG – Data Flow Graph). Такое представление является самым простым способом описания взаимосвязи между преобразованиями данных, при этом, в статическом объеме, т. е. на конечном множестве пересылок данных. Если вычислительная задача не представлена в статическом объеме, обеспечить реальное время невозможно.

На базе гибридной TTA/NISC архитектуры разработан САПР, задача которого преобразовать высокоуровневый входной алгоритм в сеть из вычислительных блоков, на котором этот алгоритм сможет выполняться в соответствии с выдвигаемыми требованиями. Центральная проблема заключается в том, что для того, чтобы это сделать, необходимо знать, какие вычислительные блоки доступны и какие функции эти вычислительные блоки могут выполнить, необходима взаимосвязь между аппаратурой и кодом.

Есть классические традиционные методы описания и моделирования вычислительных блоков, которые позволят легко свести целевой алгоритм к задаче линейного программирования, а именно к системе неравенств, решение которых напрямую транслируется в машинный [3]. Такой подход требует, чтобы было в общем виде описано то поведение, которое обеспечивают вычислительные блоки, что может быть очень непросто для вычислительных блоков со сложным поведением, например с поддержкой параллелизма в разных режимах, либо обработка функций с разными сигнатурами. Поэтому данный вариант не подходит, так как вносит ограничение на поведение вычислительных блоков.

Альтернативный вариант – построение имитационной модели вычислительных блоков, где в рамках имитационных моделей этих блоков пользователь сможет описать при помощи Тьюринг полного языка программирования любое поведение вычислительного блока [3]. Основная сложность заключается в том, чтобы САПР смог понять, каким образом модель вычислительного блока сможет симитировать поведение реального узла. Наиболее очевидный подход – вычисление всех возможных вариантов поведения вычислительного блока.

NISC архитектура не позволяет решить эту задачу, поскольку она заточена под организацию управления, в данном случае основная нагрузка лежит на TTA элементе архитектуры, поскольку в ее основе лежит пересылка данных. Таким образом, поведение вычислительного блока можно описать двумя состояниями:

- назначить блоку функцию, т. е. задать экземпляр поведения;
- загрузка или выгрузка операндов функций.

На базе полной модели вычислительного блока можно симитировать не только отдельный вычислительный блок, состоящий из предложенных вариантов работ, но также исследовать варианты дальнейшего развития вычислительного процесса. На базе этой модели, при фиксированном количестве функций, можно построить граф вариантов взаимодействия с этими моделями, где начальным этапом будет некоторое множество функций, привязанных к модели, а также нулевое состояние модели, и с каждым переходом можно выполнять те действия, на которые сейчас готова имитационная модель, т. е. назначит ей какую-нибудь функцию, либо загрузить вычислительные операнды.

Для взаимодействия между вычислительными блоками требуется коммуникационная составляющая. Если можно смоделировать отдельный вычислительный блок, можно смоделировать и сеть из этих блоков. Тогда появляется уже другой набор операций, а именно: привязка функции к вычислительному блоку или элементу сети (сеть может состоять из множества более простых сетей), либо пересылка данных (впрямую отображается в DFG). Модель сети также включает в себя все модели вычислительных блоков.

Таким образом, на данном этапе, в графе формально перечислены абсолютно все возможные варианты того, как можно работать с системой. Но этого недостаточно, так как одной из важных частей целевой системы является прикладной алгоритм, который может быть перестроен в соответствии с оптимизационными задачами. Дальше все обобщается в целевую систему, которая состоит из модели целевой системы и DFG.

Появится дополнительное количество преобразований, а именно, изменение графа передачи данных с целью оптимизации. Вышеперечисленные аспекты, такие как DFG и имитационная модель целевого вычислителя, позволяют изобразить все варианты работы системы, причем позволяют делать это не в статическом виде, а в интерактивном, когда в каждый момент времени можно опросить модель, понять, какие есть варианты, и в соответствии с ними принять решение.

В аналогичных проектах, или проектах смежных областей, например, системе HLS, можно выделить несколько стандартных этапов проектирования, где есть, например, определение вычислительных блоков в составе целевой системы, назначение функции, планирование [4]. Все эти решения входят в имитационную модель TTA/NISC процессора. Таким образом, можно взять существующие методы высокоуровневого синтеза и отобразить их на решаемую задачу, а именно на граф передачи данных и дальше обходить граф, используя эти методы.

Чтобы принимать решения, на которых основаны алгоритмы HLS, можно проаннотировать каждый вариант развития вычислительного процесса некоторым набором характеристик, например, приводит ли такая пересылка данных к блокировке вычислительного блока, сколько следующих пересылок данных разблокирует данная пересылка, на сколько загружен вычислительный блок. Кроме того, имея подобную реализацию, можно получить большие массивы данных, которые позволили бы собрать статистику относительно того, какие варианты развития решений к каким цепочками приводят. Это открывает возможность для использования машинного обучения и алгоритмов искусственного интеллекта для анализа для анализа полученного DFG [5].

Несмотря на это задача САПР NITTA заметно отличается от классической задачи HLS, в которой, как правило, есть строгая этапность, тогда как архитектура TTA/NISC позволяет системе принимать решения в произвольном виде исходя из текущего состояния имитационной модели. Это открывает путь для новых формальных и эвристических методов планирования синтеза целевой системы.

В результате работы:

- рассмотрены подходы к созданию проблемно-ориентированных вычислителей;
- описана гибридная архитектура TTA/NISC;
- описаны структуры данных для представления процесса синтеза САПР NITTA;
- сформулирован подход к построению вычислителя на базе имитационной модели вычислительных блоков и коммуникационной подсистемы нашего решения, в рамках которого получен испытательный стенд для отладки, тестирования, моделирования различных алгоритмов синтеза целевых систем, которые могут включать в себя как существующие методы из области HLS, так и машинное обучение с алгоритмами искусственного интеллекта.

Литература

1. Платунов А.Е. Теоретические и методологические основы высокоуровневого проектирования встраиваемых вычислительных систем: диссертация ... доктора технических наук: 05.13.12 / Платунов А.Е. СанктПетербург. 2010. 477 с.: ил. РГБ ОД, 71 11-5/47.
2. Платунов А.Е., Яналов Р.И. Проектирование вычислительных платформ киберфизических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 10. 993-998 с.

3. Пенской А.В. Разработка и исследование архитектурных стилей проектирования уровневой организации встроенных систем: ... канд. техн. наук / Пенской А.В. – Санкт-Петербург. 2016. 169 с.
4. Penskoï A., Gaiosh A., Platunov A., Kluchev A. Specialised computational platform for system dynamics // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM2018. 2018, Vol. 18, No. 2.1, 709-716 с.
5. Пенской А.В. Репозитории лаборатории кибер-физических систем и проекта НИТТА [Электронный ресурс], 2019. URL: <https://nitta.io> (дата обращения: 13.11.2019).



Герасименко Владислав Сергеевич
Факультет Фотоники и оптоинформатики
E-mail: lyagacruz@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО СВЕТОДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КВАНТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В.С. Герасименко

Научный руководитель – д. ф.-м. н., профессор С.А. Козлов

Аннотация

В работе оценены возможности практического изготовления светоделителей для универсальных интегрально-оптических квантовых преобразователей с тепловым управлением. Для основных возможных технологий производства волноводов проведен численный анализ свойств получаемых элементов и определен наиболее эффективный способ их изготовления. Оценены параметры получаемых светоделителей, позволяющие изготавливать сложные схемы с несколькими универсальными логическими преобразователями.

Ключевые слова

Универсальный квантовый логический преобразователь, интегральная фотоника, квантовые алгоритмы, светоделитель.

Цель проекта – подготовка технического задания на изготовление светоделителя (светоделителей) для универсального квантового интегрально-оптического переключателя.

Задачи:

1. Определение возможных техник производства волноводов для квантовых схем, включая поиск потенциальных изготовителей.
2. Для определенных в предыдущей задаче техник и доступных производителю материалов численно оценить поведение света в полосковых волноводах. По потерям в волноводе и параметрам стабилизировавшейся моды выбрать из волноводов-кандидатов пригодные для изготовления относительно больших (оценочной протяженностью от 1 мм до 1 см) схем, способных производить манипуляции над состояниями единичных фотонов.
3. Для выбранных в задаче 2 волноводов смоделировать светоделитель с коэффициентом деления 0,5, определить его физические размеры, потери и погрешность коэффициента деления.

Ранее была предложена схема универсального квантового интегрально-оптического логического элемента, не изменяющего проходящий через него сигнал и построенного с явным учетом изменений фазы на волноводном светоделителе [1]. Он описывается матрицей преобразования:

$$\hat{\mathbf{U}}(\alpha, \beta, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\varphi}{2}) \cdot e^{i(\alpha+\frac{\varphi}{2})} & -\sin(\frac{\varphi}{2}) \cdot e^{i(\beta+\frac{\varphi}{2})} \\ -\sin(\frac{\varphi}{2}) \cdot e^{i(\alpha+\frac{\varphi}{2})} & \cos(\frac{\varphi}{2}) \cdot e^{i(\beta+\frac{\varphi}{2})} \end{pmatrix},$$

где α , β , φ – фазовые задержки одноименных с изображенными на рис. 1 управляемых элементов.

Для практической реализации такого устройства необходимо определить технологию изготовления и материал волновода.

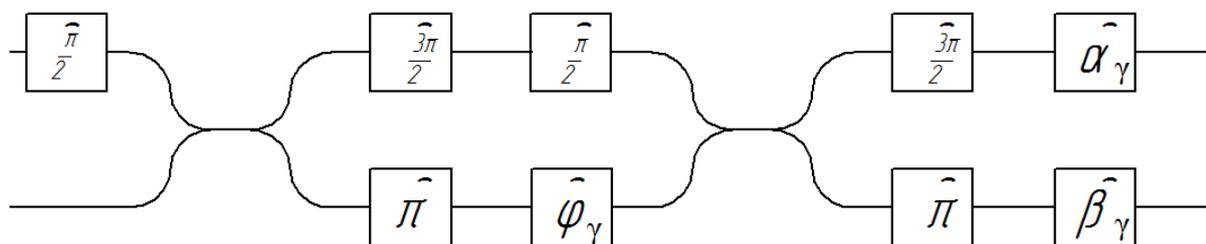


Рис. 1. Схема универсального логического вентиля. Элементы фазовой задержки изображены квадратами с указанными в них значениями прибавки к фазе, активные (управляемые) элементы отмечены нижним индексом γ

Одним из самых распространенных методов получения волноводов для устройств квантовой оптики является литографический [1, 2]. Однако оказывается, что волновод с высоким показателем преломления, изготовленный так, будет иметь слишком большие потери из-за несовершенства своих границ. Если же использовать кварц и стекла (т.е. получать структуры с низким контрастом показателей преломления между волноводом и подложкой), то значительно упадет быстродействие схемы.

Интересной альтернативой выглядят волноводы, выращиваемые на кристаллах (обычные на подложках или мембранные без них) [3, 4]. Их изготовление сложнее и дороже, чем литографических, однако отличается высокой точностью и качеством итоговых поверхностей. Некоторые материалы, например GaAs, позволяют создавать источники одиночных фотонов прямо в волноводе, что открывает возможность упростить ввод излучения в схему [4].

Также можно выделить метод ионной имплантации [5]. В плоскости поверхности подложки он сравним с выращиванием кристаллов, хотя верхняя и нижняя граница волновода могут получиться достаточно неровными. Зато эта технология позволяет комбинировать материалы волновода и подложки практически произвольным образом.

Поскольку конечной целью данного проекта является изготовление интегрально-оптического устройства, моделирование проводилось только для тех волноводов, изготовители которых известны.

Рассмотрим сначала мембранные волноводы на арсениде галлия, изготавливаемые университетом Шеффилда [4]. Нас интересуют характеристики таких оптических систем для третьего телекоммуникационного окна (характерные длины волн около 1,55 мкм). Результат их моделирования представлен на рис. 2 и 3. Рис. 2 демонстрирует полосковый волновод из GaAs в воздухе. Толщина волновода 300 нм, протяженность демонстрируемой области 30 мкм, ширина – 10 мкм. Сечение центра волновода на рис. 3 показывает, что на 30 мкм сигнал затух примерно на треть, т.е. потери оказываются порядка 140 дБ/мм. При этом приемлемыми можно условно считать потери около 0,1-0,2 дБ/мм [2]. При этом оценочные размеры, в которых должно получиться уместить один универсальный однокубитный преобразователь, составляют примерно 500 мкм, а значит через систему пройдет примерно 1 фотон на 10 млн. запущенных. Подобное положение дел совершенно исключает возможность

практического использования даже одного универсального квантового логического элемента, не говоря уже о более сложных и протяженных схемах (размерами около 1 см), так что от данных волноводов придется отказаться.

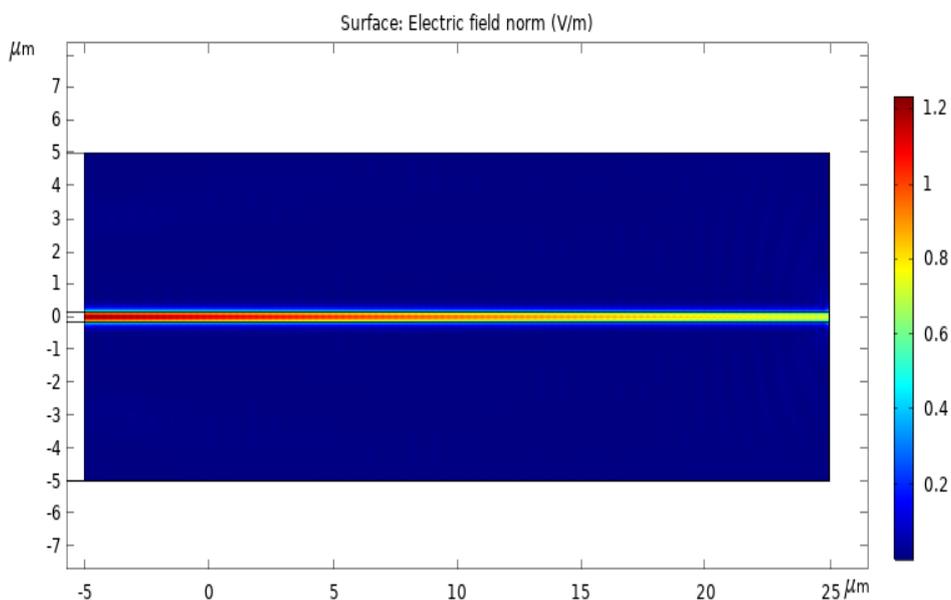


Рис. 2. Участок смоделированного полоскового волновода за область стабилизации моды для 1,55 мкм. Видно достаточно быстрое затухание, связанное с поглощением материала

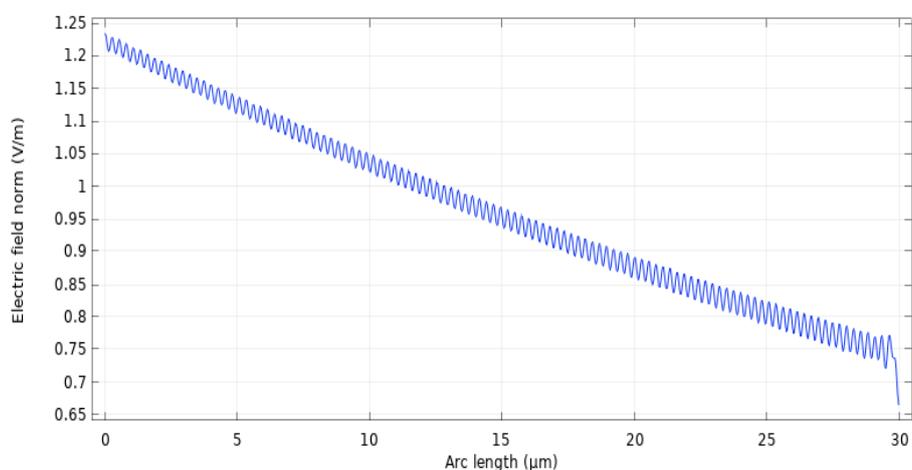


Рис. 3. Изменение напряженности электрического поля вдоль центра волновода. По графику можно оценить коэффициент затухания на длине волны 1,55 мкм как 0,14-0,15 дБ/мкм

Остался один кандидат: волновод из нитрида кремния, имплантированный в кварцевую подложку. Их изготовление можно заказать в НИЦ «Курчатовский институт». Такой волновод без дополнительной обработки оказывается незаглубленным, так что слой выше Si_3N_4 – воздушный. Моделирование проводилось так же для длины волны 1,55 мкм. На рис. 4 изображен незаглубленный волновод из нитрида кремния на кварцевой подложке. Толщина волновода 250 нм, в остальном рисунок аналогичен рис. 2. рис 5, аналогичный в свою очередь рис. 3, позволяет сделать вывод о практически полном отсутствии потерь в волноводе при его идеальном исполнении. Полученный результат вселяет оптимизм: при толщине волновода 250 нм не только не происходит отсечки (утекания энергии в окружающее пространство), но и в процессе стабилизации

моды рассеивается менее половины входного сигнала, после чего энергия никуда не пропадает. Соответственно, Si_3N_4 открывает нам перспективы получения больших (более 1 см) и сложных интегрально-оптических квантовых логических схем.

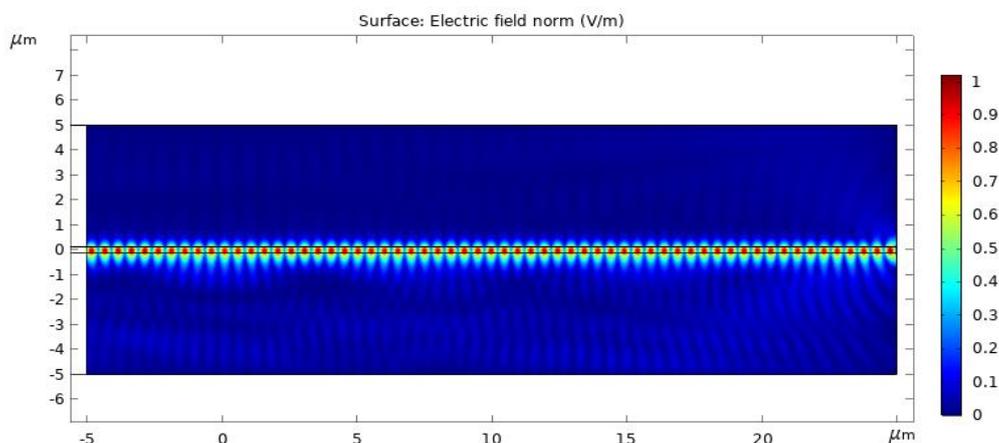


Рис. 4. Участок смоделированного полоскового волновода за область стабилизации моды для 1,55 мкм. График демонстрирует стабильность моды, хотя она и частично выходит в окружающее пространство

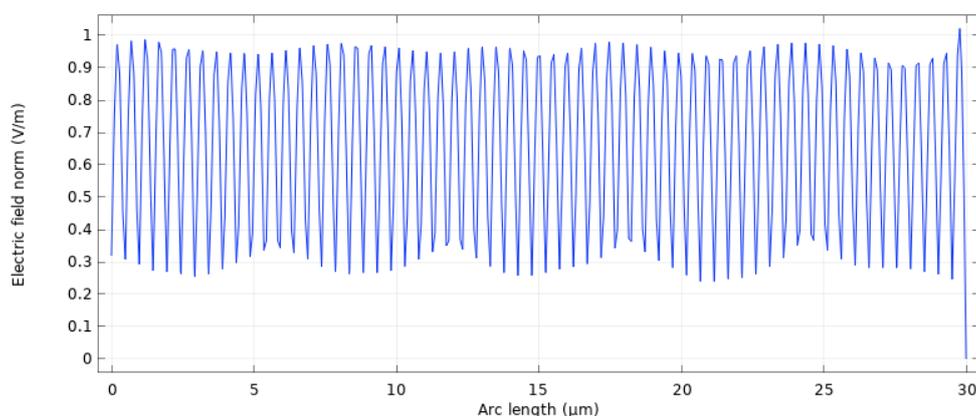


Рис. 5. Изменение напряженности электрического поля вдоль центра волновода. По графику видно, что потеря в смоделированном волноводе почти нет

После такой простой проверки было проведено моделирование светоделителя. Самым распространенным для целей квантовых вычислений является светоделитель с коэффициентом деления 0,5 [2-5]. Размеры подбирались так, чтобы ширина схемы вне области перекачки теоретически позволяла нагревать, например лазером, один из волноводов, не влияя на другой, но потери при этом были минимальны (они растут с увеличением расстояния между волноводами). Непосредственно важная часть поместилась на области 60 на 30 мкм. На рис. 6 демонстрируется общий его вид, на осях – размеры схемы в микрометрах. Толщина волновода 250 нм, радиусы скруглений S-образных изгибов – 15 мкм, ширина зазора в области деления света подбиралась так, чтобы точность коэффициента деления была не меньше 1%.

Результаты моделирования (рис. 6) показали, что при минимальном расстоянии в области перекачки 210 нм коэффициент деления совпадает с желаемым с точностью 1%, а потери составляют 2%. Подобный результат нас вполне устраивает: его потенциал масштабирования составляет примерно десятки светоделителей. Это, впрочем, очень

оптимистичный прогноз – на практике при изготовлении волноводов будут возникать как неточности создания геометрии, так и рассеивающие дефекты поверхностей. Но это уже тема дальнейших изысканий. Также еще предстоит подробнее исследовать связь геометрии S-образного изгиба и потерь в светоделителе.

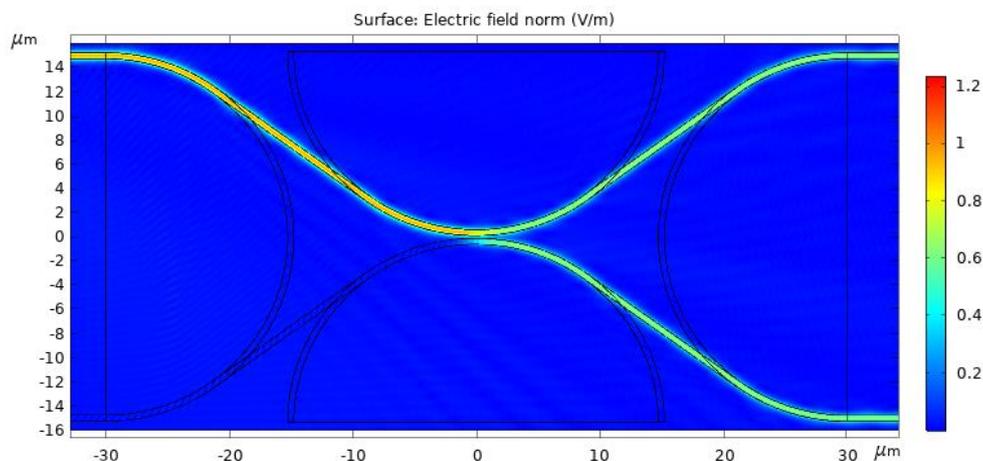


Рис. 6. Результат моделирования светоделителя (коэффициент деления 0,5) на нитриде кремния для длины волны 1,55 мкм. График демонстрирует как близость коэффициента к 0,5, так и почти полное отсутствие потерь

В результате проделанной работы:

- на основании анализа свойств линейных волноводов в качестве материала выбран нитрид кремния;
- смоделирован светоделитель 50:50, размерами 60 на 30 мкм, с потерями 2% и погрешностью коэффициента деления 1%;
- в качестве вероятного изготовителя выбран НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Герасименко В.С. Расчет распространения света в оптических квантовых схемах с тепловым управлением // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО / под ред. д.т.н., профессора В.О. Никифорова. Сборник трудов. СПб.: Университет ИТМО, 2018. с. 147-149.
2. Matthews J.C.F., Politi A., Stefanov A., and O'Brien J.L. "Manipulation of multiphoton entanglement in waveguide quantum circuits." // Nature Photonics. 2009. 3(6). p.346-350.
3. Zhang Y., McKnight L., Engin E., Watson I.M., Cryan M.J., Gu E., Thompson M.G., Calvez S., O'Brien J.L., and Dawson M.D. "GaN directional couplers for integrated quantum photonics." // Applied Physics Letters. 2011. 99(16). p.161119.
4. Bishop Z.K. et al. Electro-mechanical control of an on-chip optical beam splitter containing an embedded quantum emitter // Optics letters. 2018. Т. 43. №. 9. p. 2142-2145.
5. Vasilev A.B., Kozubov A.V., Gaidash A.A., Chivilikhin S.A. On-chip realization of quantum circuits by using waveguides on Si3N4 // Journal of Physics: Conference Series. 2016. 741(1). p. 012104.



Залеская Юлия Константиновна
Факультет Лазерной фотоники и оптоэлектоники
E-mail: jz15@mail.ru

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАКЕТА ВНУТРЕННЕГО БЛОКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Ю.К. Залеская

Научный руководитель – доцент А.С. Алейник

Аннотация

В статье приведен анализ современной научно-технической литературы, на основе которого спроектирована схема внутреннего блока (ВБ) усиления подводного телекоммуникационного эрбиевого оптического усилителя (ПТЭОУ). Посредством проведения численного моделирования определены тип, модель и длина активного эрбиевого оптического волокна (АЭОВ) для достижения оптимальных параметров усилителя. На основании полученных данных создан и исследован макет ВБ ПТЭОУ. В ходе экспериментального исследования макета ВБ ПТЭОУ были получены зависимости выходной оптической мощности, коэффициента шума и усиления макета от мощности входного сигнала. Согласно полученным результатам, максимальное значение выходной оптической мощности макета составило 55 мВт, максимальное значение усиления макета составило 32 дБ, минимальное значение коэффициента шума макета составило 3,9 дБ.

Ключевые слова

Телекоммуникационный эрбиевый оптический усилитель, активное эрбиевое оптическое волокно.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время применяются в сетях различного масштаба: на их основе построены магистральные, региональные (областные), городские и трансконтинентальные подводные линии связи [1]. Потери в оптическом волокне составляют 0,24 дБ/км, а стандартный оптический бюджет мощности, при применении наиболее часто применяемых оптических передатчиков, составляет примерно 30 дБ, поэтому передача по протяженным линиям связи сигналов невозможна без их усиления. В 1985 – 1990 годах были проведены исследования, которые привели к появлению эрбиевых усилителей. Усилители на оптическом волокне (ОВ), легированном ионами эрбия, сочетают в себе такие свойства, как отсутствие необходимости преобразования оптического сигнала в электрический и совпадение спектральной области усиления эрбиевого волокна с областью третьего окна прозрачности ОВ [2, 3].

На все компоненты подводных ВОЛС, в том числе и на подводные телекоммуникационные эрбиевые оптические усилители (ПТЭОУ) налагаются повышенные требования по надёжности и качеству производства. К конструкции корпуса ПТЭОУ предъявляются повышенные требования [4]: устойчивость к коррозии;

устойчивость к давлению воды; полная герметичность соединений; защита от перепадов тока и напряжения; ударная и вибрационная устойчивость; длительный срок службы.

С ростом километража подводных ВОЛС и увеличением объемов передаваемой информации возникла необходимость оптимизации параметров ПТЭОУ (получение наилучшего соотношения между такими параметрами, как выходная оптическая мощность, коэффициент шума, усиление), поэтому создание телекоммуникационного эрбиевого усилителя для подводных применений с оптимальными параметрами, конструкция которого отвечает повышенным требованиям, является достаточно актуальной задачей.

Цель проекта – создание макета внутреннего блока телекоммуникационного эрбиевого оптического усилителя для подводных магистральных линий связи с оптимальными относительно существующих решений техническими характеристиками.

Для достижения данной цели был поставлен ряд задач:

- провести анализ существующих схем построения ВБ ПТЭОУ;
- провести численное моделирование наиболее подходящей схемы построения ВБ ПТЭОУ;
- выбрать на основании проведенного моделирования тип и модель наиболее оптимального (позволяющего получить наилучшее соотношение между такими параметрами, как выходная оптическая мощность, коэффициент шума, усиление) активного эрбиевого оптического волокна (АЭОВ) для данной схемы и определить наиболее подходящую длину АЭОВ для повышения технических характеристик усилителя;
- создать макет ВБ ПТЭОУ с оптимальным типом и моделью АЭОВ по предложенной оптической схеме, провести экспериментальное исследование его параметров и оценку соответствия полученных экспериментальных данных с данными моделирования.

Основными элементами эрбиевого усилителя являются АЭОВ, лазерный диод накачки (ЛДН) и оптический разветвитель [5]. Максимальная эффективность накачки эрбиевого волокна достигается на длинах волн 980 нм и 1480 нм. Накачку возможно осуществлять в прямом и обратном направлении по отношению к направлению распространения оптического сигнала. Существует также двунаправленная накачка, при которой ОВ накачивается с двух сторон одновременно. Двунаправленная накачка позволяет использовать два источника накачки, при этом повышая суммарную мощность накачки и стабильность выходных параметров такого усилителя за счет более равномерного распределения излучения накачки по длине ОВ [6].

Накачка эрбиевого волокна на длине волны 1480 нм позволяет обеспечить максимальную энергетическую эффективность (86%), так как накачка на длине волны 1480 нм производится с максимальной квантовой эффективностью (91%), в отличие от излучения на длине волны 980 нм (55% и 86% соответственно). Накачка эрбиевого волокна излучением на длине волны 980 нм позволяет теоретически обеспечить полную инверсную населенность ионов эрбия в сетке кварцевого стекла, в то время как излучение на длине волны 1480 нм не позволяет достичь полной инверсии населенности основного и метастабильного энергетических уровней. Для получения большой выходной мощности и низкого уровня шумов для противонаправленной накачки используется ЛДН с длиной волны 1480 нм, а для сонаправленной накачки – 980 нм [1].

Одной из проблем при создании эрбиевых усилителей является возникновение узкополосной лазерной генерации из-за обратных отражений от торца ОВ и от подключенных оптических устройств, поэтому на его вход и выход устанавливается волоконно-оптический изолятор (ВОИ), который имеет окно пропускания в области отличной от длин волн накачки [7, 8].

Одним из основных требований, предъявляемых к конструкции внутреннего блока подводного телекоммуникационного эрбиевого оптического усилителя, является длительный срок наработки на отказ. ВБ ПТЭОУ строятся с учетом необходимости резервирования жизненно важных подсистем для предотвращения отказа линии связи при поломке одной из подсистем и повышения времени наработки на отказ, так как они являются необслуживаемыми. Наиболее уязвимыми в этом плане компонентами схемы являются ЛДН, поэтому в данном проекте предложена схема с их дублированием для повышения надежности ПТЭОУ.

Типовая схема подводного телекоммуникационного эрбиевого оптического двунаправленного усилителя представлена на рис. 1.

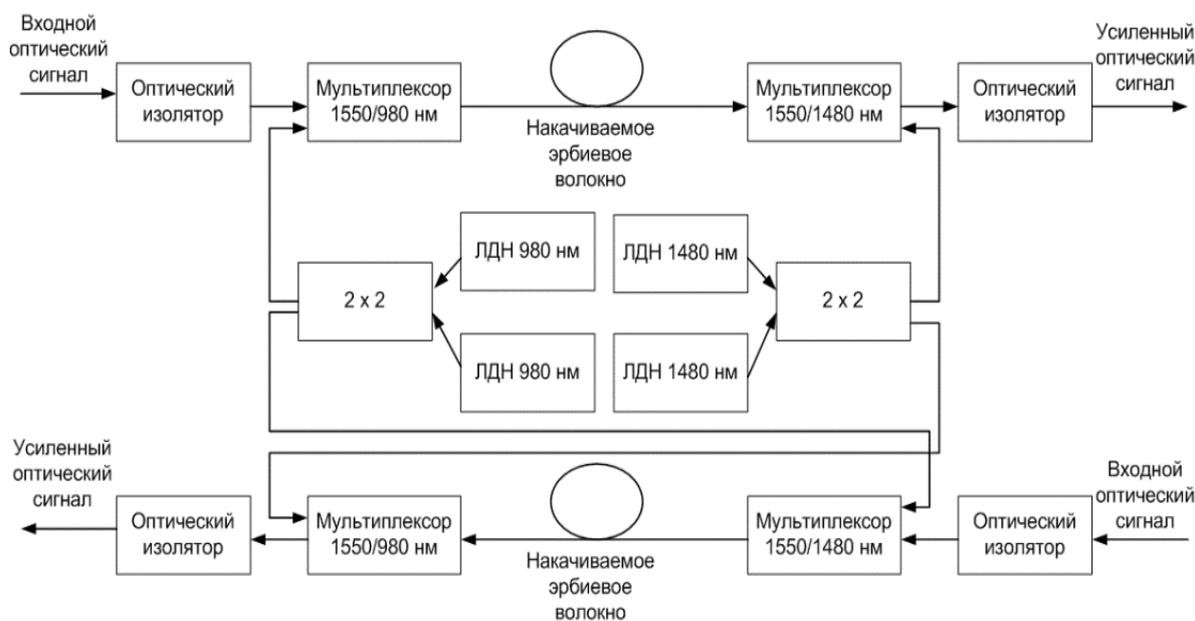


Рис. 1. Схема подводного телекоммуникационного эрбиевого оптического двунаправленного усилителя

Данная схема функционирует следующим образом – при воздействии излучения накачки от двух ЛДН, работающих на длинах волн 980 нм и 1480 нм, вводимого в активное эрбиевое волокно при помощи мультиплексоров, происходит усиление оптического сигнала, поступающего на вход схемы, в спектральной области 1,5-1,6 мкм.

Для данной схемы был выбран диапазон длин волн, соответствующий области наиболее линейной характеристики усиления и низкого коэффициента шума одновременно – 1546 – 1557 нм, что соответствует 25-38 каналам стандартной сетки ITU-T (C-диапазон). Для данной схемы были выбраны ОВ компании Fibercore, так как согласно результатам проведенных ранее экспериментов с волокнами различных производителей у них наблюдался наиболее высокий КПД. В работе применены эрбиевые волокна I-4 и I-25.

В ВОЛС для увеличения расстояния одного пролета (расстояния между усилителями в 100 км) необходимо достичь высокого уровня коэффициента усиления (порядка 30 дБ), а для построения линий с большим количеством усилителей необходимо максимально снизить коэффициент шума ПТЭОУ (не более 4 дБ). Для выбора типа АЭОВ и его оптимальной длины, при которых будут достигнуты минимальный уровень шума и максимальная равномерность коэффициента усиления, было проведено моделирование схемы ВБ ПТЭОУ в программе “GainMaster” компании Fibercore (рис. 2).

Для выбора типа АЭОВ и его оптимальной длины были получены следующие зависимости – для значений мощности входного сигнала 1мкВт, 100мкВт, 1мВт и 3 мВт (диапазон от -30 дБм до +5 дБм) были получены зависимости среднего значения усиления и уровня шума ВБ ПТЭОУ, значения Peak-to-Peak (неравномерности) коэффициента усиления от длины ОВ и абсолютного значения выходной мощности от длины ОВ для двух типов эрбиевых волокон: I-4 и I-25.

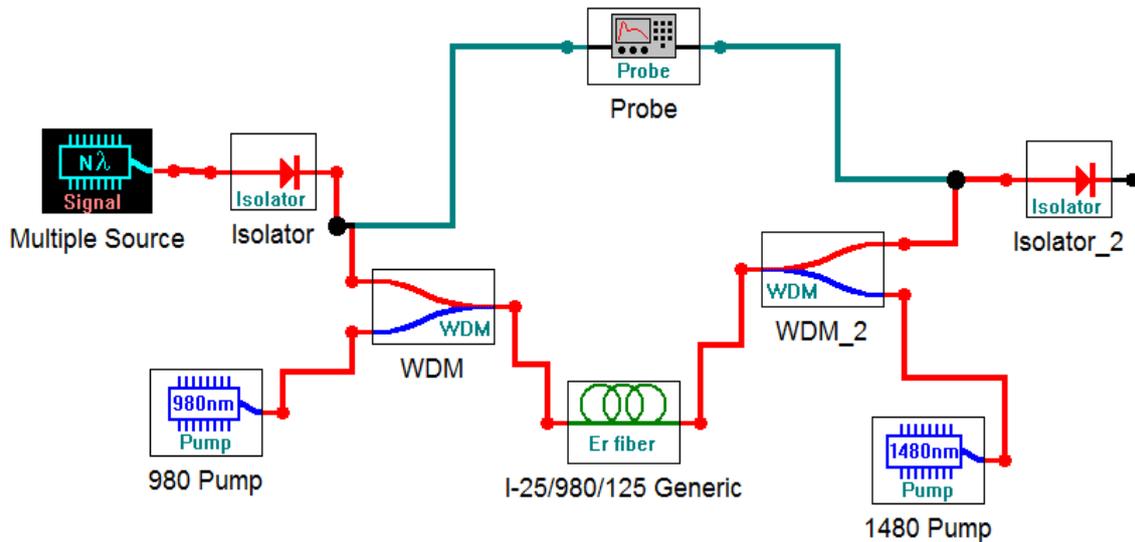


Рис. 2. Оптическая блок-схема ВБ ПТЭОУ в программе “Gainmaster”

В результате анализа полученных данных был сделан вывод, что при усилении малого сигнала (1 мкВт) коэффициент шума и значение неравномерности коэффициента усиления схемы с ОВ I-4 меньше, чем те же параметры схемы с ОВ I-25. На основании полученных данных был произведен выбор АЭОВ I-4 для формирования макета ПТЭОУ и проведения его экспериментального исследования.

По схеме, представленной на рис. 3, был создан макет ВБ ПТЭОУ с двунаправленной накачкой с использованием АЭОВ I-4.

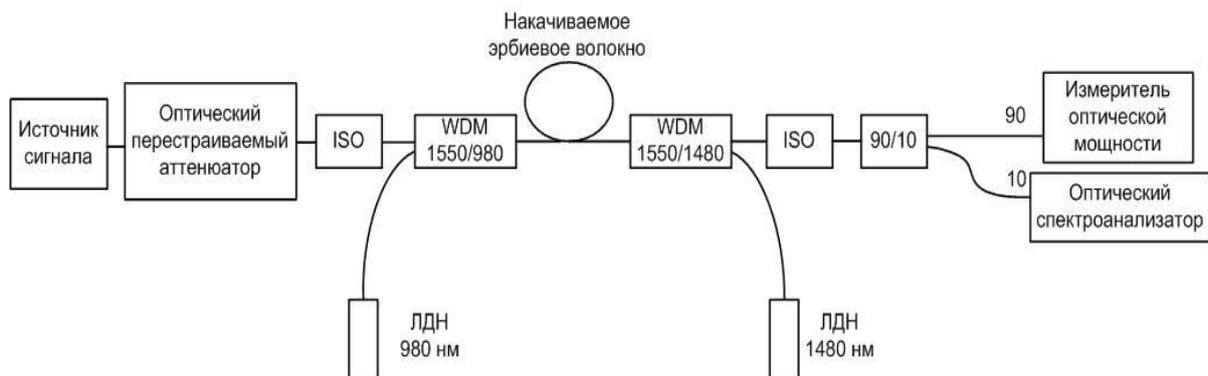


Рис. 3. Схема макета ВБ ПТЭОУ

В качестве источника сигнала используется SFP-модуль, для контроля мощности входного сигнала установлен перестраиваемый аттенуатор, для регистрации мощности

результатирующего излучения используется измеритель оптической мощности, а для регистрации его спектра – спектроанализатор.

Для экспериментального исследования макета и получения зависимости выходной мощности, усиления и коэффициента шума от мощности входного сигнала ВБ ПТЭОУ был создан автоматизированный измерительный стенд (рис. 4).

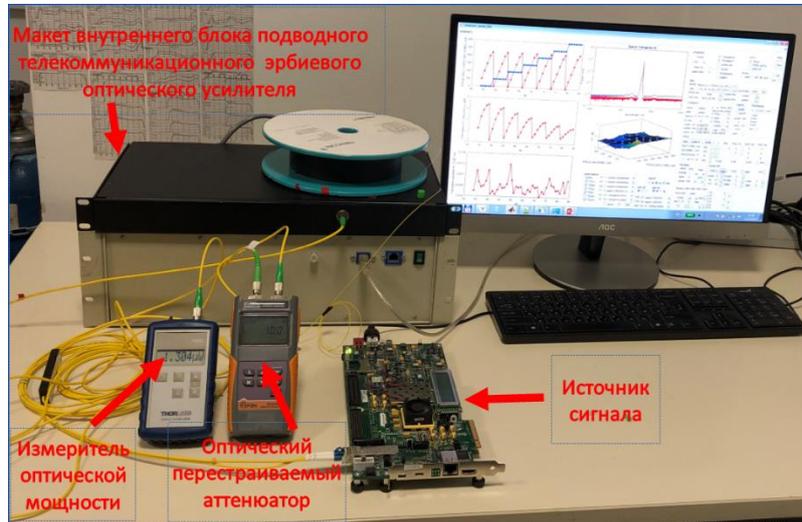


Рис. 4. Автоматизированный измерительный стенд для исследования макета ВБ ПТЭОУ

Экспериментально были получены значения выходной мощности, усиления и коэффициента шума макета ВБ ПТЭОУ. Также было проведено численное моделирование схемы макета ВБ ПТЭОУ в программе “GainMaster” компании Fibercore (рис. 2). При значениях мощности входного сигнала 1 мкВт, 10 мкВт, 50 мкВт, 100 мкВт, 500 мкВт, 1 мВт было произведено вычисление значений выходной мощности, усиления и коэффициента шума данной модели ВБ ПТЭОУ.

В результате численного моделирования структурной схемы и экспериментального исследования макета ВБ ПТЭОУ были получены зависимости значения усиления и коэффициента шума от мощности входного сигнала данной модели ВБ ПТЭОУ (рис. 5, 6).

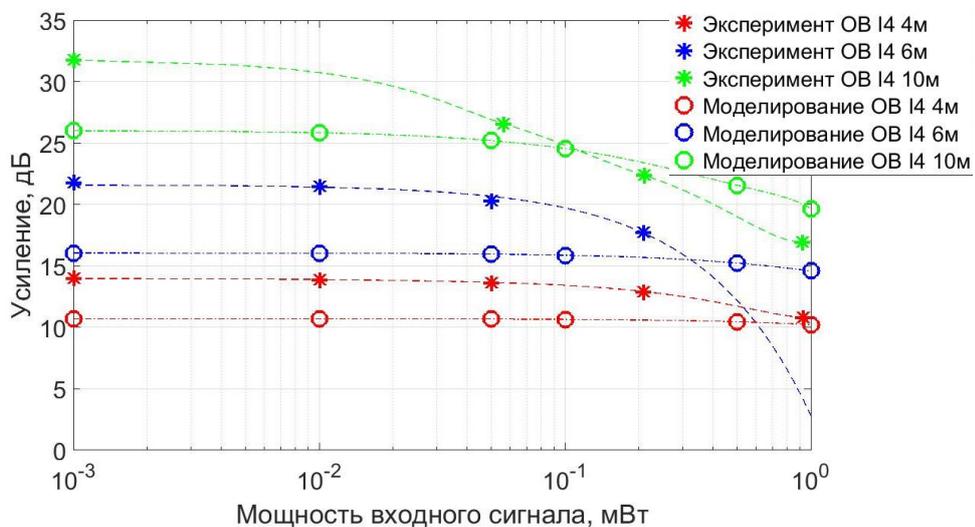


Рис. 5. Зависимость усиления модели и макета ВБ ПТЭОУ от мощности входного сигнала

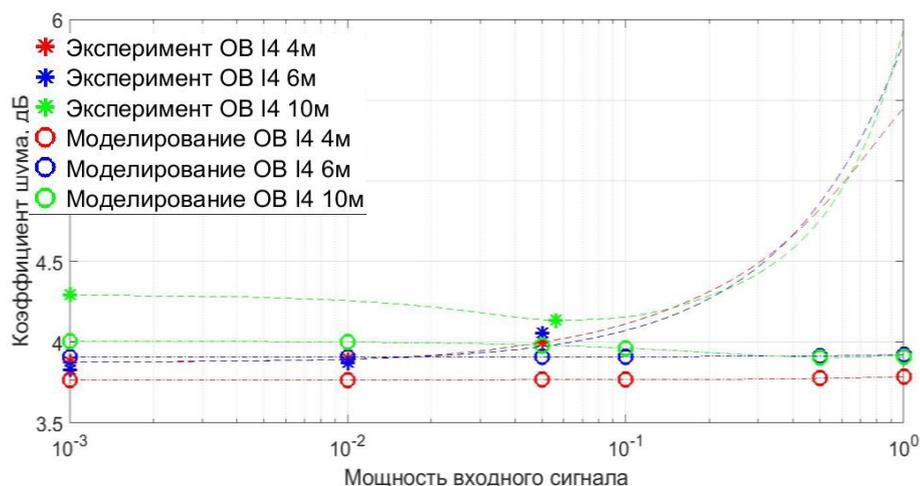


Рис. 6. Зависимость коэффициента шума модели и макета ВБ ПТЭОУ от мощности входного сигнала

При анализе полученных графиков зависимостей было установлено, что данные, полученные в результате численного моделирования структурной схемы и экспериментального исследования макета ВБ ПТЭОУ совпадают, отличия между ними объясняются наличием потерь на оптических соединениях и местах сварки ОВ. Было установлено, что при увеличении мощности входного сигнала падает уровень значения усиления и возрастает уровень значения коэффициента шума модели и макета ВБ ПТЭОУ. Максимальный уровень значения усиления модели и макета ВБ ПТЭОУ (до 32 дБ) достигается в конструкции с 10 м активного ОВ I4, при этом наблюдается также максимальный уровень значения коэффициента шума (до 4,3 дБ). Минимальный уровень значения коэффициента шума модели и макета модели и макета ВБ ПТЭОУ (до 3.9 дБ) достигается в конструкции с 4 м активного ОВ I4 при значении коэффициента усиления до 14 дБ.

Согласно полученным результатам, максимальное значение выходной оптической мощности макета составило 55 мВт, максимальное значение усиления макета составило 32 дБ, минимальное значение коэффициента шума макета составило 3.9 дБ. Полученные результаты соответствуют уровню характеристик ПТЭОУ ведущих мировых производителей, таких как Xtera (США), NEC (Япония), Huawei (Китай).

Литература

1. Курков А.С., Наний О.Е. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // Lightwave russian edition. 2003. № 1. С. 14-19.
2. Mears R.J., Reekie L., Jancie I.M., Payne D.N. Highgain rareearth doped fiber amplifier at 1.54 μm // OSA Technical Digest Series. 1987. №3. С.167.
3. Huang W., Wang X., Cai Z., Xu H., Ye. C. A pump power insensitive high stability L-band erbium-doped superfluorescent fibre source // Journal of optics a: pure and applied optics. 2005. Т. 7. С. 179-182.
4. Harasawa S., Sumitani M., Ohta K. Reliability Technology for Submarine Repeaters // FUJITSU Sci. Tech. J. 2008. № 4. С. 148-155.
5. Алейник А.С., Кикилич Н.Е., Козлов В.Н., Власов А.А., Никитенко А.Н. Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 593–607.

6. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. №10. С. 881–900.
7. Su H.C., Lon A. Wang A highly efficient polarized superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope applications // IEEE Photonics Technology Letters. 2003. Т. 15. № 10. С. 1357-1359.
8. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y. Wavelength stability of a high-output, broadband, Er-doped superfluorescent fiber source pumped near 980 nm // Optics Letters. 1990. Т. 16. № 12. С. 961-963.



Карманова Наталия Андреевна
Факультет Безопасности информационных технологий
E-mail: natali.karmanova@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕР ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА ЗАКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «ИНСТИТУТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ»

Н.А. Карманова
Научный руководитель – доцент И.Б. Бондаренко

Аннотация

В статье описывается построение технической архитектуры информационной защиты ситуационного центра на основе анализа существующих решений для корпоративных сетей, а так же предлагается метод рефлексивного анализа информационной защиты на основе алгебры логики Лефевра, позволяющий провести связь между информационно-психологическим явлением и физическим. Тем самым при построении информационной защиты в автоматизированной системе используется модель, учитывающая слабое звено в виде лица, принимающего решение.

Ключевые слова

Безопасность ситуационных центров, защита принятия решения, информационно-психологическое воздействие, рефлексивный анализ.

Ситуационные центры являются наиболее эффективной формой реализации системы поддержки принятия решения, для лица, принимающего решение на всех уровнях управления. Однако надо понимать, каким новым угрозам такие инновационные комплексы и системы подвержены. Именно системы поддержки принятия решения в большей степени подвержена им из-за человеческого фактора в виде лица, принимающего решение [1].

Целью работы было обеспечение информационной безопасности ситуационного центра ЗАО «Институт телекоммуникаций». Для ее достижения решались следующие задачи:

- проведение комплексного анализа деятельности предприятия ЗАО «Институт телекоммуникаций»;
- анализ информационных ресурсов ситуационного центра ЗАО «Институт телекоммуникаций», состава источников информации, распределенного информационного фонда, типа баз данных информационного фонда, базовых информационных технологий, основных классов технологий, представления информации, аналитической обработки информации, типовых комплексных программно-технических средств;
- прогнозирование и оценка угроз информационным ресурсам ситуационного центра предприятия и разработки мер по обеспечению информационной безопасности.

Суть предлагаемого решения по обеспечению информационной безопасности в территориально-распределенной корпоративной сети заключается в следующих принципах [2]:

- корпоративный сегмент сети построить с помощью VirtualPrivateNetwork;
- включить в корпоративную защищенную сеть ряд контролируемых точек открытого доступа;
- эшелонированную СЗИ построить, применяя контроль включения в защищенный сегмент сети;
- обеспечить аудит и дистанционное администрирование всех частей СЗИ с глубокой проработкой вопросов событийного протоколирования и подотчетности пользователей, технического персонала, внешних абонентов.

В результате проведенного анализа существующих решений по защите информации наиболее эффективными для данного случая были признаны и выбраны для использования в данной ИС «Блокхост-сеть К», «Рубикон», «Dr.WebEnterpriseSecuritySuite», Cisco 2911. Выбранные технические средства, решения и методы обеспечивают защиту каждого уровня (физический, технологический, пользовательский, сетевой, управления) в соответствии с самыми жесткими требованиями, и при этом все используемые в СЗИ технические средства стремятся проявить свою функциональность на каждом уровне модели.

В процессе анализа проблемной ситуации и выработки решения с использованием информационно-вычислительных ресурсов ЦС существуют два фактора, влияющих на качество этого решения. Во-первых, это субъективный характер самого процесса принятия решения. Кроме этого, между субъектом, принимающим решение, и объектом, на который это решение направлено, стоит некоторая информационно-вычислительная модель проблемной ситуации, которая может быть переведена в состояние, когда она будет неадекватно отражать проблемную область [3].

Предлагаемый нами метод рефлексивного анализа информационной защиты на основе алгебры логики Лефевра позволяет провести связь между информационно-психологическим явлением и физическим. Тем самым при построении информационной защиты в автоматизированной системе использовать модель учитывающую слабое звено человека в виде лица, принимающего решения [4]. С этой точки зрения были выделены следующие классы угроз процессу принятия решений:

- решение не будет принято к моменту, когда это необходимо;
- решение принято, но оно кем-то навязано в требуемом виде;
- решение принято, но спрогнозировано тем, от кого оно должно быть скрыто;
- решение не доведено вовремя до исполнителя.

Выбранная трехзвенная модель информационного противодействия показывает этапы осознания информационно-вычислительной модели проблемной области при взаимодействии ЛПР, злоумышленника и администратора безопасности [5].

Представленные многочлены описывают процедуру принятия решения в условия информационного противодействия.

Для каждого субъекта конфликтующей структуры справедливо описание:

$$S(t)=P\{T; A; D; R\} \cdot \omega, \quad (1)$$

где T – средства, A – цель, D – доктрина, R – результат (формализованное решение), ω – оператор осознания.

Таким образом описание администратора безопасности поддержки принятия решения будет выглядеть следующим образом:

$$S_x(t) = P\{T_x; A_x; D_x; R_x\} \cdot \omega = f(k_x), \quad (2)$$

а для нарушителя:

$$S_y(t) = P\{T_y; A_y; D_y; R_y\} \cdot \omega = f(k_y). \quad (3)$$

Тогда защищенность системы можно определить, как отношение описания администратора безопасности и нарушителя, а результат будет являться темпом осознания картины плацдарма.

$$Z(t) = \frac{S_x(t)}{S_y(t)} = \frac{P\{T_x, A_x, D_x, R_x\} \cdot \omega}{P\{T_y, A_y, D_y, R_y\} \cdot \omega} = \frac{f(k_x)}{f(k_y)} = \frac{k_x}{k_y} \quad (4)$$

Процесс принятия решения в ходе рефлексивного управления динамической защитой поддержки принятия решения посредством формирования доктрины нарушителя

Рассмотрим ситуацию, соответствующую многочлену 5:

$$S = P + P_x + (P + P_x)_y, \quad (5)$$

при последовательном процессе осознания администратором и нарушителем.

$$\frac{A_{xy}}{T_{xy}} (D_{xy} \Rightarrow D_x) \supset \frac{R_{xy}}{T_{xy}} \rightarrow \frac{R_{xy}}{T_y} \rightarrow \frac{R_{xy} A_y}{T_y} D_y \supset \frac{R_y}{T_y} \quad (6)$$

Для ситуации соответствующей многочлену 7

$$S = P + [P + (P + P_x)_y]_x, \quad (7)$$

при последовательном процессе осознания администратором и нарушителем.

$$\frac{A_{yx}}{T_{yx}} (D_{yx} \Rightarrow D_y) \supset \frac{R_{yx}}{T_{yx}} \rightarrow \frac{R_{yx}}{T_{yx}} \rightarrow \frac{R_{yx} A_x}{T_x} D_x \supset \frac{R_x}{T_x} \quad (8)$$

Процесс принятия решения в ходе рефлексивного управления динамической защитой поддержки принятия решения посредством формирования структуры средств защиты

Рассмотрим ситуацию, соответствующую многочлену 9.

$$S = P + P_x + (P + P_x)_y, \quad (9)$$

при последовательном процессе осознания администратором и нарушителем.

$$\frac{A_{xy}}{T_{xy} \Rightarrow T_x} D_{xy} \supset \frac{R_{xy}}{T_{xy} \Rightarrow T_x} \rightarrow \frac{R_{xy}}{T_y} \rightarrow \frac{R_{xy} A_y}{T_y} D_y \supset \frac{R_y}{T_y} \quad (10)$$

Для ситуации соответствующей многочлену 11

$$S = P + [P + (P + P_x)_y]_x, \quad (11)$$

при последовательном процессе осознания администратором и нарушителем.

$$\frac{A_{yx}}{T_{yx} \Rightarrow T_y} D_{yx} \supset \frac{R_{yx}}{T_{yx} \Rightarrow T_y} \rightarrow \frac{R_{yx}}{T_x} \rightarrow \frac{R_{yx} A_x}{T_x} D_x \supset \frac{R_x}{T_x} \quad (12)$$

Процесс принятия решения в ходе рефлексивного управления динамической защитой поддержки принятия решения посредством формирования цели нарушителя

Рассмотрим ситуацию, соответствующую многочлену 13

$$S = P + P_x + (P + P_x)_y, \quad (13)$$

при последовательном процессе осознания администратором и нарушителем.

$$\frac{A_{xy} \Rightarrow A_x}{T_{xy}} D_{xy} \supset \frac{R_{xy}}{T_{xy}} \rightarrow \frac{R_{xy}}{T_y} \rightarrow \frac{R_{xy} A_y}{T_y} D_y \supset \frac{R_y}{T_y} \quad (14)$$

Для ситуации соответствующей многочлену 15

$$S = P + [P + (P + P_x)_y]_x, \quad (15)$$

при последовательном процессе осознания администратором и нарушителем.

$$\frac{A_{yx} \Rightarrow A_y}{T_{yx}} D_{yx} \supset \frac{R_{yx}}{T_{yx}} \rightarrow \frac{R_{yx}}{T_x} \rightarrow \frac{R_{yx} (A_{yx} \Rightarrow A_y)}{T_x} D_x \supset \frac{R_x}{T_x} \rightarrow \frac{R_{yx}}{T_x} \rightarrow \frac{R_{yx} A_x}{T_x} D_x \supset \frac{R_x}{T_x} \quad (16)$$

Таким образом, были разработаны следующие меры по обеспечении Информационной безопасности ситуационного центра ЗАО «Институт телекоммуникаций»:

Меры по противодействию угрозам внедрения по сети вредоносных программ:

- антивирусное средство «Dr.Web Enterprise Security Suite»;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам внедрения ложного объекта как в ИС, так и во внешних сетях:

- маршрутизатор Cisco 2911 установленным ПО CiscoIOS версии 15.X.

Меры по противодействию угрозам от действий вредоносных программ:

- антивирусное средство «Dr.Web Enterprise Security Suite»;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам типа «отказ в обслуживании»:

- маршрутизатор Cisco 2911 установленным ПО CiscoIOS версии 15.X;
- межсетевой экран и система обнаружения вторжений «Рубикон».

Меры по противодействию угрозам сканирования:

- маршрутизатор Cisco 2911 установленным ПО CiscoIOS версии 15.X;
- межсетевой экран и система обнаружения вторжений «Рубикон»;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам удаленного запуска приложений:

- маршрутизатор Cisco 2911 установленным ПО CiscoIOS версии 15.X;
- межсетевой экран и система обнаружения вторжений «Рубикон»;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию подмены доверенного объекта в сети:

- маршрутизатор Cisco 2911 установленным ПО CiscoIOS версии 15.X;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам утраты ключей и атрибутов доступа:

- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам выявления паролей по сети:

- межсетевой экран и система обнаружения вторжений «Рубикон»;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам перехвата за пределами контролируемой зоны:

- туннелирование VPN;
- маршрутизатор Cisco 2911 установленным ПО CiscoIOS версии 15.X;
- политика безопасности предприятия.

Меры по противодействию угрозам наличия недеklarированных возможностей системного ПО и ПО для обработки закрытых сведений:

- блокхост-сеть К;
- политика безопасности предприятия;
- ПО, сертифицированное ФСТЭК.

Меры по противодействию угрозам принятию решения:

– комплексное использование организационных, технологических мер и технических решений, программных, аппаратных и специальных средств, увязанных в единый комплекс для эффективного и оперативного использования с целью принятия решения ко времени, когда это необходимо;

– использование методов рефлексивного анализа и контроля информационных потоков средствами защиты на всех уровнях доступа к защищаемым ресурсам СЦ с целью своевременного принятия решения;

- использование средств стеганографической защиты, для скрывания факта информационного обмена с целью предотвращения прогнозирования принятия решения теми, от кого оно должно быть скрыто;
- использование методов и средств контроля доступа к информации, целостности и непротиворечивости данных в процессе хранения и передачи с целью своевременного доведения решения до исполнителя;
- использование для обмена данными сетевых протоколов обмена, предотвращающих несвоевременное принятие и доведение решения;
- использование средств криптографии, в том числе, в рамках механизмов реализации электронно-цифровой подписи для предотвращения прогнозирования принятия решения;
- использование методов контроля электромагнитных излучений средствами вычислительной техники; для предотвращения утечки информации с целью прогнозирования решения;
- использование эффективных методов и средств обнаружения и борьбы с компьютерными вирусами, а также рефлексивного входного контроля информационных потоков с целью предупреждения навязывания принятия решения;
- правовое обеспечение защиты лица, принимающего решение;
- разработка методических, нормативно-технических документов и руководств по обеспечению безопасного принятия решения;
- подбор и подготовка специалистов, по информационно-психологическому противодействию;
- для построения моделей сценарного анализа информационного противодействия необходимо применения алгебры логики В. Лефевра.

Литература

1. Ефремов В.А., Статьев В.Ю. Место информационной телекоммуникационной системы специального назначения в государственном управлении. /Информационно-публицистический сборник ФАПСИ, 1994, №2.
2. Иоффин А.И. Системы поддержки принятия решений. М.: Мир ПК, 1993, №5.
3. Петров А.В., Тихомиров М.М., Федулов Ю.Г. Применение ситуационных центров в региональном управлении. М.: РАГС, 2018.
4. Лефевр В.А. Конфликтующие структуры. М. «Высшая школа». 1967.
5. Лефевр В.А. Алгебра совести. М., «Когито-Центр». 2003.



Кутьянова Лилия Радиковна
Факультет Низкотемпературной энергетики
E-mail: lkutyanova4568@gmail.com

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В СТУПЕНЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Л.Р. Кутьянова

Научный руководитель – д.т.н. А.Ю. Баранов

Аннотация

Теплообменный аппарат является одной из основных единиц оборудования на линии сжижения природного газа. При крупнотоннажном производстве СПГ используются спиральновитые, пластинчато-ребристые теплообменные аппараты и классические кожухотрубчатые испарители. Первые два вида теплообменников берут на себя роль главного ТОА предварительного охлаждения в каскадном процессе охлаждения, а пластинчато-ребристые как правило используются как теплообменники-холодильники компрессорной станции. Основной проблемой главного теплообменника является сложность конструкции, большие габариты, что в свою очередь затрудняет процесс транспортировки, и недоступность технологии изготовления в России. Многопоточный витой теплообменник должен иметь большую теплопередающую поверхность порядка 25 – 50 тыс. м². Главной идеей проекта является замена огромного витого теплообменника на пакет пластинчато-ребристых теплообменников (cold boxes), потому что у последних есть ряд преимуществ над витыми ТОА: относительно небольшие габариты, большая теплопередающая поверхность по отношению к размеру теплообменника и экономическая выгода.

Ключевые слова

Крупнотоннажное производство СПГ, теплообменное оборудование, отбросная теплота.

Крупнотоннажное производство СПГ основано на потреблении большого количества энергии, которое затрачивается на отвод теплоты переохлаждения и конденсации больших объемов природного газа. Энергетической основой процесса отвода теплоты является сжатие в компрессорах, а вся энергия, затраченная в процессе сжатия, и теплота, отведенная от ожимаемого газа, сбрасываются в окружающую среду. Количество тепловой энергии, которую нужно рассеять в окружающей среде, в 1,5 раза больше энергии, затраченной на реализацию процесса ожижения. При крупнотоннажном производстве СПГ в окружающую среду сбрасывают огромное количество вторичной тепловой энергии, которое необходимо утилизировать без ущерба для окружающей среды.

Проблему утилизации данных выбросов решают на всех заводах переработки метана, чаще всего, когда СПГ завод стоит в акватории, используют для отвода теплоты морскую воду. При этом отбросная теплота удаляется за счет естественной циркуляции морской воды. В проекте «Балтийский СПГ» на всех этапах технологического цикла запланировано использование аппаратов воздушного охлаждения. Они должны решить проблему сброса теплой воды в акваторию мелководного Финского залива. При этом

упускается из виду низкая энергетическая эффективность таких аппаратов. Интенсивность отвода теплоты газовой конвекцией существенно ниже, чем при конвекции жидкости. Число теплообменных аппаратов, использованных в технологической цепи, достаточно велико, поэтому тепловая энергия рассеивается безвозвратно.

Крупнотоннажное производство СПГ связано с потреблением большого количества энергии, которое затрачивается на ожижения больших объемов природного газа. Масштабы проблемы можно показать на примере проекта «Балтийский СПГ», в рамках которого предполагается производить 10 млн тонн в год. Получение 320 кг/с сжиженного метана требует затраты на уровне 1 ГВт.

Вся энергия, затраченная при ожижении, сбрасывается в окружающую среду, а к ней добавляется теплота ожижения метана, в общем 900 кДж/кг. В сумме количество тепловой энергии, которая должна быть рассеяна в окружающую среду, в рамках проекта «Балтийский СПГ» оценивается почти в 1,5 ГВт. Необходимо утилизировать эту теплоту без ущерба для окружающей среды [3].

Цель проекта – разработать научные основы утилизации 1,5 ГВт вторичной тепловой энергии на побережье Финского залива, т.е. с минимальным уровнем негативного воздействия на экологию региона, повысить энергоэффективность производства СПГ за счет снижения потерь, связанных с низкой теплоотводящей способностью воздуха, и вовлечения в технологический оборот гигантского объема вторичной теплоты.

Задачи:

1. Выполнение литературного обзора и по теме проекта;
2. Оценки современного состояния конструктивных и технологических решений;
3. Подготовка информации для формирования условий однозначности необходимых для построения физических и математических моделей аппаратов.

При крупнотоннажном производстве СПГ сжижение осуществляется посредством каскадных процессов охлаждения с использованием различных хладагентов в каждом холодильном цикле. В каскадных циклах находят применение многопоточные витые теплообменные аппараты. Они изготавливаются путем намотки труб на сердечник. Между слоями труб и между отдельными трубами с помощью прокладок оставляют небольшие зазоры. Трубы и прокладки между слоями выполняются из алюминия, трубные доски и корпуса – из алюминия или нержавеющей стали. Второй вид теплообменников, используемых на производстве СПГ – ребристо-пластинчатые. Холодные и горячие потоки подаются между ребристыми пластинами, которые спаяны в пакеты и собраны в корпусе. Традиционные кожухотрубчатые ТОА применяются как теплообменники-холодильники на компрессорных станциях.

На рис. 1 изображена принципиальная схема каскадного цикла ожижения природного газа, где К1, К2, К3, К4 – компрессоры; ТО1, ТО2, ТО3 – теплообменные аппараты; ОЖ – отделитель жидкости; ДВ1, ДВ2, ДВ3, ДВ4 – дроссельные вентили. Каскад включает в себя три цикла предварительного охлаждения, сначала ПГ сжимается в компрессоре К4, охлаждается внешним источником, затем последовательно охлаждается испарившимися пропаном до 231 К, этиленом - 169 К и метаном - 111 К, дросселируется в ДВ4 и поступает в отделитель жидкости ОЖ и далее к потребителю. Пропановый поток газа сжимается в К2, охлаждается внешним источником водой, затем поступает в главный теплообменник и дросселируется в ДВ1 и поступает в ТО1 как хладагент, охлаждая прямые потоки, далее возвращается в компрессор. Этиленовый поток после компримирования в К3 охлаждается внешним источником, обратным потоком в ТО1, ТО2, расширяется в ДВ2 и поступает в ТО2 в виде обратного потока,

затем возвращается в компрессор K2. Метан сжимается в компрессоре K3, охлаждается внешним источником, проходит последовательно три теплообменника TO1, TO2, TO3, охлаждаясь обратными потоками, далее дросселируется в ДВ3, поступает в TO3 для охлаждения ПГ, затем поступает обратно в компрессор K3 (рис. 2).

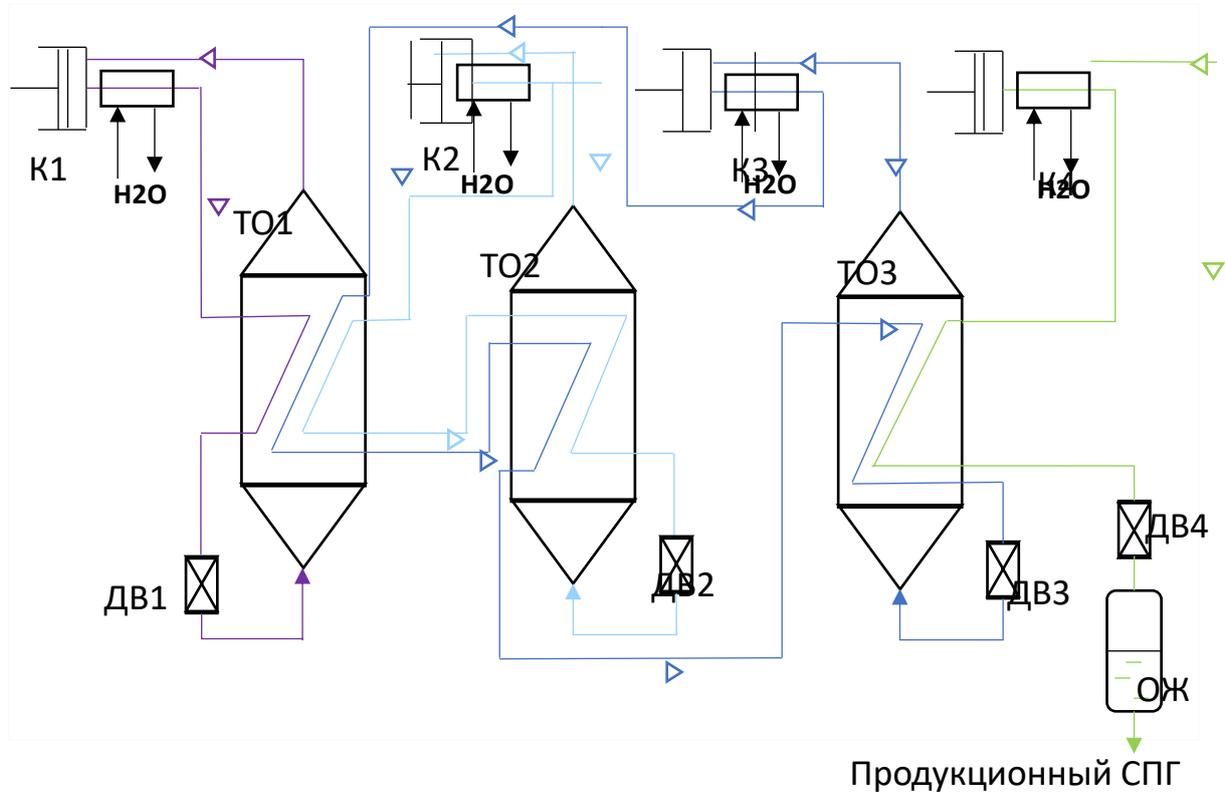


Рис. 1. Принципиальная схема каскадного цикла сжижения ПГ, [1]

— пропан; — этилен; — метан;
— природный газ,

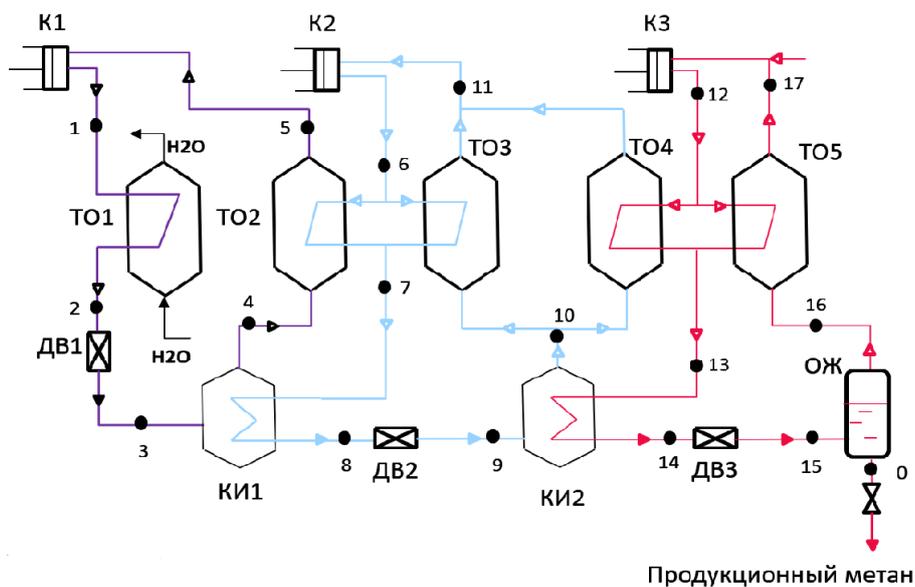


Рис. 2. Принципиальная схема установки сжижения метана [2],

— пропан; — этилен; — метан;

Главный ТО1 является четырехпоточным, он как правило витой, имеющий наибольшую теплопередающую поверхность (площадь поверхности теплообменного оборудования в оптимизированном каскадном цикле может достигать 160 тыс. м²). все это усложняет расчеты на этапе проектирования. Чтобы облегчить данную задачу такие теплообменники разделяют на два и более отдельных ТО. Данная схема несет наиболее обобщенный ознакомительный характер и имеет ряд недостатков (метановый поток возвращается в компрессор с температурой ожижения природного газа), чтобы привести ее к готовому расчетному виду, обращаются к схемам сжижения метана, т.к. во-первых, концентрация метана в пг на месторождениях может достигать от 70 до 98%, во-вторых, на каждом месторождении различная концентрация составляющих компонентов, что приводит к отдельным расчетам теплофизических свойств пг.

На рис. 2 изображена принципиальная схема установки сжижения метана, где К1, К2, К3 – компрессоры; ТО1, ТО2, ТО3, ТО4, ТО5 – теплообменные аппараты; ОЖ – отделитель жидкости; ДВ1, ДВ2, ДВ3 – дроссельные вентили; КИ1, КИ2 – конденсаторы-испарители; ОЖ – отделитель жидкости; точки 0 – 17 отмечают состояние газа или жидкости после К1, ДВ1 и т. д. [2].

В первом каскаде цикла пропан сжимается в К1 до давления 1МПа, затем охлаждается в ТО1, в котором в качестве хладагента выступает вода. Пропан расширяется в ДВ1, где конденсируется, и поступает в КИ1, там испаряется, и в виде пара поступает в ТО2, охлаждая половину потока этилена, и обратно в компрессор.

Во втором каскаде цикла К2 сжимает этилен до 1,86 МПа, затем этилен разделяется и поступает в два параллельно работающих теплообменных аппарата ТО2 и ТО3. В первом этилен охлаждается парами пропана из КИ1, а во втором теплообменнике этилен охлаждается своими парами из КИ2. В КИ1 этилен конденсируется, расширяется в ДВ2 и поступает в КИ2, где отдает теплоту метановому потоку и охлаждается свой прямой поток в ТО3, затем поступает обратно в компрессор [4].

Метановый цикл сжимается в К3 до 2,45 МПа, далее процесс аналогичен второму каскаду, но после расширения в ДВ3 метан поступает в отделитель жидкости, где жидкая фаза поступает к потребителю, а испарившаяся возвращается в ТО5, где охлаждает свой прямой поток, после ТО5 газообразный поток метана объединяется с недостающей долей потока и возвращается в К3 [2].

Проведем результаты предварительного расчетного анализа цикла сжижения метана (таблица) для определения удельных затрат энергии l_0 , коэффициент ожижения x и величины циркулирующего потока воды G_{H_2O} , потока пропана $G_{C_3H_8}$ и потока этилена $G_{C_2H_4}$ при допущениях, что гидравлическое сопротивление в теплообменниках $\Delta P_{гидр.ТО} = 0$, теплоприток из окружающей среды $q = 4 \frac{кДж}{кг}$, $G_{CH_4} = G_{CH_4}^{ож} + G_{CH_4}^ц = 1кг$, где ож – ожиженное, ц – циркулируемое [5].

Таблица

Результаты предварительного расчетного анализа цикла

Параметр	G_{H_2O} , кг	$G_{C_3H_8}$, кг	$G_{C_2H_4}$, кг	$l_0, \frac{МВт \cdot ч}{кг CH_4}$	x
Результат	20,88	5,9	2,14	2,23	0,64

По полученным результатам можно определить дальнейшие перспективы развития проекта:

- разработка программного обеспечения для реализации математических моделей аппаратов, обеспечивающих отвод тепловых технологических выбросов;
- отладка специализированного программного обеспечения;

– выполнение серий математических экспериментов по оценке энергетической эффективности различных вариантов утилизации вторичной теплоты при крупнотоннажном производстве СПГ.

Литература

1. Баранов А.Ю., Кутьянова Л.Р. Теплообменные аппараты, используемые для охлаждения природного газа в ступенях предварительного охлаждения Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб.: Университет ИТМО. 2019. Режим доступа: <https://kmu.itmo.ru/digests/article/476>, своб.
2. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 159 с.
3. Герш С.Я. Глубокое охлаждение. М. "ГосЭнергоИздат" 1957. 392 с.
4. Усюкин И.П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. М. Пищевая промышленность 1976. 343 с.
5. LNGas.ru [Электронный ресурс] Сжиженный природный газ. URL: <http://lngas.ru/lng-equipment/teploobmenniki-plastinchatye-navitye.html> (дата обращения: 21.02.2019).



Смирнова Антонина Юрьевна
Факультет Низкотемпературной энергетики
E-mail: antonina.smi@yandex.ru

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ – ТАРГЕТИРОВАНИЕ В БЕСКОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ, ЗАДАВАЕМОМ НЕПОЛНОТОЙ ЗНАНИЙ О ПРОЦЕССЕ

А.Ю. Смирнова

Научный руководитель – доцент Ю.А. Кустиков

Аннотация

Рассмотрена интеграция управления рисками в процессы принятия решений, ключевых процессов и культуру «ФГУП «ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева». В рамках работы были рассмотрены существующие методы идентификации, анализа и оценки рисков. Разработана политика риск-менеджмента метрологического института, шкалы оценки вероятности и тяжести последствий риска. На основе оценки событий риска составлена матрица влияния риска на процесс, которая обоснованно позволяет спланировать очередность управления рисками.

Ключевые слова

Риски, риск-менеджмент, критерий приемлемости риска, шкала оценки вероятности и тяжести последствий риска.

Цель проекта – интеграция управления рисками в процессы принятия решений, ключевых процессов и культуру «ФГУП «ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева».

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Обзор существующих методов идентификации, анализа, и оценивания риска;
2. Разработка политики риск-менеджмента метрологического института;
3. Разработка шкал вероятности и влияния риска на процесс;
4. Построение матрицы влияния риска на процесс, выделение зон рисков;
5. Определение критерия приемлемости риска.

Сегодня управление рисками на повестке каждой организации, будь она частная или государственная. Много внимания уделяется управлению рисками со стороны государства и регуляторов. Так например, новая редакция международного стандарта ИСО/МЭК 17025:2017 [1] обязывает каждую испытательную лабораторию включать в свою систему менеджмента процедуру, описывающую действия по управлению рисками и возможностями. В действующем ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [2] риск упоминается в контексте необходимости его учёта при принятии решений. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [3, 4] содержит требования, что организация должна управлять своими рисками, возможностями и применять в своей деятельности риск-ориентированное мышление.

Риск-менеджменту сегодня придается такое большое значение, что этот элемент должен в обязательном порядке присутствовать во всех стандартах ISO на системы менеджмента. Обусловлено это тем, что в стандартах отказываются от

предупреждающих действий. Правопреемником этого раздела становится раздел, описывающий требования к действиям по отношению к рискам и возможностям.

Процесс управления рисками включает следующие основные стадии:

- планирование действий по управлению рисками и возможностями;
- оценку рисков (включает в себя идентификацию, анализ и оценивание риска);
- воздействие на риск;
- мониторинг и пересмотр рисков;
- оценку эффективности и результативности мероприятий по управлению

рисками и возможностями.

Управление рисками и возможностями должно происходить на плановой и внеплановой основе при изменении внутреннего и внешнего контекста.

Оценка риска – процесс, объединяющий идентификацию, анализ и оценивание риска. Оценка риска обеспечивает понимание возможных опасных событий, их причин и последствий, вероятности возникновения и принятия решений:

- о необходимости принимать соответствующие действия;
- о необходимости воздействия на риски;
- о способах снижения рисков.

Идентификация рисков – заключается в определении возможных событий (результатов процессов или действий). Цель данного этапа заключатся в составлении полного перечня рисков, основанных на событиях, которые могут создавать, повышать, предотвращать, снижать, ускорять или задерживать достижение целей организации.

Для идентификации рисков рекомендуется использовать следующие методы:

- метод мозгового штурма;
- диаграмму Исикавы;
- метод галстук-бабочка;
- метод экспертных оценок и др.

Методы идентификации могут использоваться как по отдельности, так и вместе.

При анализе рисков группа по оценке рисков и/или эксперт устанавливают конкретные причины и источники риска.

Результаты анализа рисков документируются владельцем риска и/или экспертом в реестре рисков.

Оценивание риска в лаборатории может проводиться с помощью матрицы последствий и вероятности согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 [4] с целью установления тяжести и вероятности наступления последствий риска и ранжирования уровня риска.

Группа по оценке рисков и/или эксперт определяет вероятность риска по шкале вероятности риска согласно таб. 1.

Таблица 1

Шкала вероятности риска

Оценка события риска, у.е.	Вероятность события риска	Интерпретация
1	Очень низкая	Событие очень маловероятно, ожидаемая частота проявления не реже одного раза в 10 лет
2	Низкая	Событие маловероятно, ожидаемая частота проявления не реже одного раза в 5 лет
3	Средняя	Событие вероятно, ожидаемая частота проявления не реже одного раза в 2 года

продолжение таблицы

Оценка события риска, у.е.	Вероятность события риска	Интерпретация
4	Высокая	Событие очень вероятно, ожидаемая частота проявления не реже одного раза в год
5	Очень высокая	Событие может произойти в любое время

Если существуют сомнения в оценке вероятности возникновения опасного события, то ранг опасности события повышают.

После определения оценки вероятности риска необходимо присвоить количественную оценку влияния риска на процесс в условных единицах. Группа по оценке рисков и/или эксперт определяет тяжесть последствий риска по шкале тяжести и последствий риска согласно таб. 2.

Таблица 2

Шкала тяжести последствий риска

Оценка влияния риска, у.е.	Интерпретация	Тяжесть последствий
1	Очень слабое влияние на процесс	Последствия практически незаметны
2	Слабое влияние	Последствия приведут к некоторым неудобствам
3	Среднее влияние	Последствия неприятны
4	Значительное влияние	Последствия серьезные
5	Сильное влияние	Последствия очень серьезные
6	Очень сильное влияние	Последствия приведут к краху

Общую оценку риска рассчитывают путем умножения оценки вероятности на оценку тяжести последствий риска. Для ВНИИМ были выделены 4 основные зоны риска, представленные в таб. 3.

Матрица позволяет обоснованно спланировать очередность управления рисками. По результатам оценивания риска владелец риска и/или эксперт заполняет реестр риска.

В зависимости от оценки риска должны быть определены предпринимаемые действия по каждому риску, зарегистрированному в реестре риска.

Для рисков, оценка которых составляет 10 у.е. и выше должны быть разработаны действия по минимизации или устранению рисков. Те риски, оценка которых не превышает значение 10 у.е., следует принять во внимание и ежегодно отслеживать значение и зону риска при составлении реестра риска.

В ходе выполнения проекта согласно поставленным задачам выполнена разработка процедуры управления рисками, которая включает в себя методы, рекомендуемые стандартом ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы

оценки риска. Основой процедуры является разработка политики риск-менеджмента для метрологического института с указанием структуры управления рисками. Риски во ВНИИМ рассматриваются как основа для планирования.

Таблица 3

Матрица влияния риска на процесс

		Оценка риска, у.е.					
		1	2	3	4	5	6
Вероятность возникновения риска, у.е	1	1	2	3	4	5	6
	2	2	4	6	8	10	12
	3	3	6	9	12	15	18
	4	4	8	12	16	20	24
	5	5	10	15	20	25	30
		1	2	3	4	5	6
		Влияние риска на процесс, у.е					

	– зона низкого риска (1-4);
	– зона среднего риска (5-9);
	– зона высокого риска (10-18);
	– зона очень высокого риска (20-30).

Применение документированной процедуры управления рисками возможно для любой организации. Данная процедура не зависит от вида деятельности организации и может быть адаптирована для необходимой системы менеджмента. Ведь все организации, независимо от того, насколько они большие или маленькие, сталкиваются с внутренними и внешними факторами, которые создают неопределенность, смогут ли они достигнуть своих целей. Эффектом от этой неопределенности является риск и он присущ всем видам деятельности.

Данный проект нашел свою реализацию в деятельности Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева и стал самостоятельной документированной процедурой в рамках действующей системы менеджмента ВНИИМ.

Литература

1. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Введ. 2019-09-01. М.: Стандартиформ. 2019. 32 с.
2. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Введ. 2012-01-01. М.: Стандартиформ. 2010. 70 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2015-11-01. М.: Стандартиформ. 2015. 32 с.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска. Введ. 2011-12-01. М.: Стандартиформ, 2012. 74 с.



Старкова Полина Сергеевна
Химическо-биологический кластер
E-mail: sps_96@mail.ru

ДЕТЕКЦИЯ ДВУХЦЕПОЧЕЧНЫХ ШТАММОВ MYCOBACTERIUM TUBERCULOSIS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДНК-НАНОМАШИНЫ

П.С. Старкова

Научный руководитель – профессор Д.М. Колпащиков

Аннотация

Детектирование ампликонов ДНК на основе флуоресцентных гибридизационных зондов используется для диагностики инфекционных заболеваний человека, например, при количественной ПЦР. Однако, связывание зонда с двухцепочечным (ds) ДНК-ампликоном может быть неэффективным, поскольку зонд должен конкурировать с цепью ДНК, комплементарной целевой цепи. В статье представлено решение данной проблемы с помощью «умных» ДНК-ассоциаций, оснащенных дополнительными аналит-связывающими руками, которые называются «ДНК-наномашинами». Три ДНК-наномшины были разработаны для селективного обнаружения двухцепочечного штамма *Mycobacterium tuberculosis* (MtB). Система использует гибридизационные зонды, которые организуют наномолекулярную структуру, состоящую из нитей ДНК и дезоксирибозимов (BiDz), что позволяет стабильной бактериальной структуре ДНК раскручиваться с последующим распознаванием. Экспериментальная оценка собранной ДНК-наномшины показывает, что с её помощью распознавание ДНК в три раза более селективно, чем распознавание при помощи BiDz. Кроме того, ДНК-наномшины имеют меньший предел детекции (LOD) по сравнению с BiDz при гибридизации с одноцепочечной (ss) ДНК MtB. Этот диагностический инструмент обеспечивает основу для различных применений в молекулярной диагностике инфекций человека.

Ключевые слова

Mycobacterium tuberculosis, бинарный дезоксирибозим, ДНК-наномашина, гибридизационный зонд, флуоресценция.

Современные гибридизационные зонды необходимы для специфического распознавания бактериальных и вирусных штаммов. Однако, зонды часто имеют недостаточную селективность в отношении вариаций отдельных нуклеотидов, что важно для генотипирования бактерии. Здесь мы предлагаем решить данную задачу при помощи ДНК нанотехнологии: мы разработали ДНК-наномшины на основе BiDz, которые могут связывать dsДНК с увеличенной аффинностью и распознавать однунуклеотидные замены (SNP) с высокой селективностью.

Каталитические молекулы ДНК, известные также как дезоксирибозимы [1] являются биотехнологическими инструментами для анализа нуклеиновых кислот, чьи легко изменяемые конструкции позволяют обнаруживать различные целевые последовательности [2]. При таком подходе нити DzA и DzB ДНК-наномшины

связываются с целевой ДНК и формируют каталитическое ядро дезоксирибозима, которое расщепляет флуорофор и меченный гасителем флуоресцентный субстрат (F-sub), что приводит к получению флуоресцентного сигнала (рис. 1А). Кроме того, активные ДНКзимы способны к многократному расщеплению универсального субстрата. Помимо регулируемой структуры, основными преимуществами дезоксирибозимов являются химическая стабильность, чувствительность, обусловленная усиленным каталитическим сигналом во времени, экономически эффективным синтезом цепей и возможностью анализа нуклеиновых кислот, минуя ПЦР. Здесь мы применили альтернативу аллостерически регулируемым дезоксирибозимным сенсорам и молекулярным зондам – структуру ViDz [3], которая в отличие от первых не только устраняет фоновую активность в отсутствие целевого аналита путем изменения концентрации нитей сенсора, но также обеспечивает надлежащую селективность по отношению к SNP [4], так как две короткие аналит-связывающие руки обеспечивают вдвое более высокую селективность только с полностью комплементарными аналитами, в отличие от одного длинного каркаса [5].

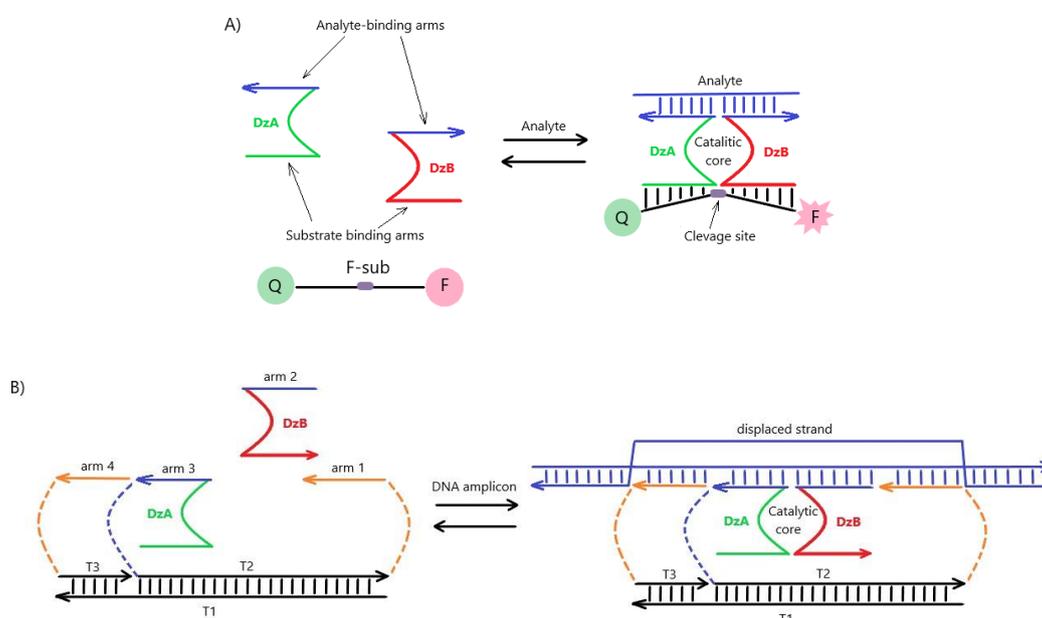


Рис. 1. А) Структура ViDz. В) Конструкция ДНК-наномашины основана на принципе дезоксирибозима

Однако гибридационный зонд не способен разматывать и распознавать стабильную dsДНК, учитывая термодинамическую стабильность последнего. Следовательно, оснащение функцией разматывания ДНК для ViDZ способствует облегченному доступу к целевой последовательности и достижению наиболее низкого LOD. Учитывая каталитическую эффективность ДНК, эта проблема может быть решена путем усиленного связывания комплекса ампликон-ДНК-наномашин и улучшенной доставки субстрата к активному сайту с использованием ViDz, связанного с каркасом нитей ДНК [5]. Тем не менее, существует вероятность того, что длинный каркас ДНК сложится во вторичные структуры, что приведет к снижению сродства к целевому фрагменту. В этом исследовании трех-нитевой ДНК-комплекс (Т1, Т2, Т3, рис. 1В) формирует множественные взаимодействия для формирования ДНК наномашин. Аналит-связывающая рука 3 является частью цепи DzA, которая соединена с Т2 и заканчивается в аналит-связывающей руке 1, в то время как DzB отделена от остального комплекса для обеспечения низкого фона в отсутствие целевого аналита

[6-10]. Другими словами, аналит-связывающие руки 1, 3, 4 помогают раскрыть вторичную структуру аналита, которая облегчает посадку ViDz на целевой последовательности, в то время как аналит-связывающая рука 2 отвечает за дифференцирование SNP.

Исследование продемонстрировало способность ДНК-наномашины раскручивать стабильную структуру dsДНК и обнаруживать специфические гены систем токсин-антитоксина (ТА) взаимодействий II типа, связанных с MtB, где эти SNP коррелируют с определенной генетической линией. Такое разделение штаммов MtB, в том числе имеющих клиническую значимость, по девяти основным генотипам с использованием 13 генов систем ТА типа II (рис. 2) позволит выявлять устойчивые к лекарственным средствам генетические линии MtB. Минимально достаточный набор генов для генотипирования показывает, что после классификации SNP в первом гене число генов для анализа уменьшается в два раза.

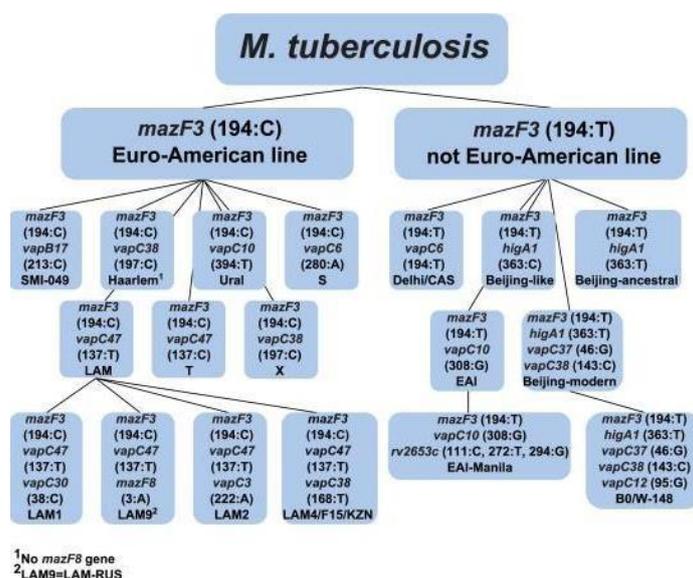


Рис. 2. Схема типирования штаммов MtB с использованием 13 генов ТА системы II типа

Итак, мы сравнили эффективность работы ViDz с ДНК-наномашинами при детекции трех генов двухцепочечного аналита MtB.

Все гибридационные зонды и наномашинны были первоначально оптимизированы с использованием синтетических аналитов ssДНК. Отжиг олигонуклеотидов сопровождался их последующей самоорганизацией, что в итоге составляет структуру ДНК-наномашинны. Праймеры были разработаны для получения ампликонов, содержащих области, связанные с SNP. ДНК MtB была любезно предоставлена профессором М.В. Зайчиковой (Институт общей генетики им. Вавилова). Собранные наномашинны анализировали в 1,5% агарозном геле с использованием системы электрофореза в горизонтальном геле BioRad. Флуоресценция образцов определялась при 517 нм (возбуждение при 485 нм) после инкубации при 50 ° С в течение 60 и 180 мин в реакционном буфере (50 мМ HEPES, pH 7.4, 50 мМ MgCl₂, 20 мМ KCl, 120 мМ NaCl, 0.03% Triton X-100, 1% DMSO17). Реакционные смеси содержали 200 нМ F-sub, 2 нМ DzA и 10 нМ DzB или 10 нМ ДНК-наномашинны. Для определения эффективности ДНК-наномашинны мы рассчитали LOD в зависимости от концентрации сенсора, концентрации аналита и продолжительности анализа.

Для генотипирования MtB, мы сначала разработали панель сенсоров и ДНК-наномашинны для генов *mazF3*, *vapC37*, *vapC38-2* для селективного

и чувствительного обнаружения, по крайней мере, Haarlem, LAM, LAM4/F15/KZN генотипов в соответствии со схемой типирования штаммов MtB. Затем мы исследовали способность сенсоров обнаруживать синтетические ssДНК и полученные dsДНК. После 60 минут анализа все сенсоры дают значительный детектируемый сигнал выше отрицательного контроля в присутствии специфических аналитов (рис. 3А), что подтверждается результатом, полученным после 3 часов инкубации (рис. 3В).

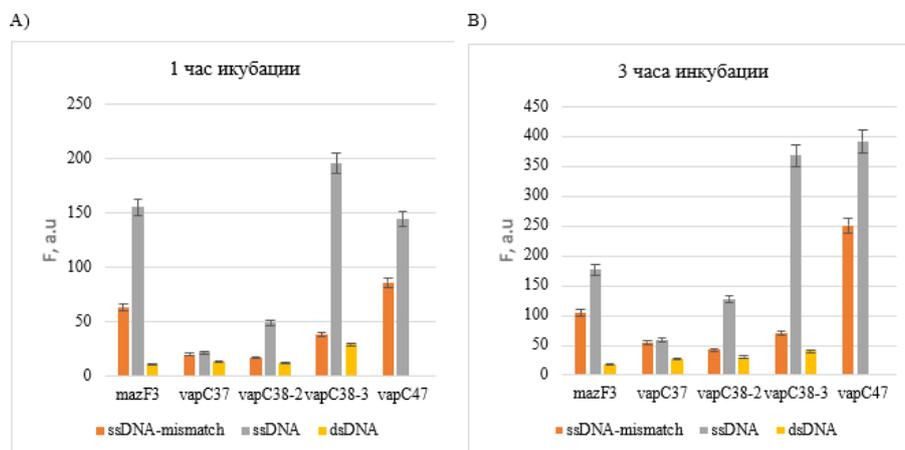


Рис. 3. Обнаружение ssДНК и dsДНК с помощью ViDz. Нити DzA (2 нМ), DzB (10 нМ) и F-sub (200 нМ) инкубировали в присутствии 1 нМ синтетических ssДНК или 3 нМ dsДНК при 50 °С. Оранжевым цветом на гистограмме обозначены ssДНК с одним SNP, серым цветом обозначена ssДНК полностью комплементарная соответствующим сенсорам

Концентрацию ампликонов измеряли с помощью гель-денситометрии. Сборка ДНК-наномашин была подтверждена анализом в агарозном геле (рис. 4А, В). Последующая инкубация и измерение флуоресценции показали, что после 1 часа инкубации ДНК-наномашин способны детектировать dsДНК MtB (5 нМ) с трехкратно, а через 3 ч инкубации с четырнадцатикратно более высоким сигналом флуоресценции, чем ViDz. Однако флуоресцентный сигнал для ssДНК остается выше, чем для dsДНК.

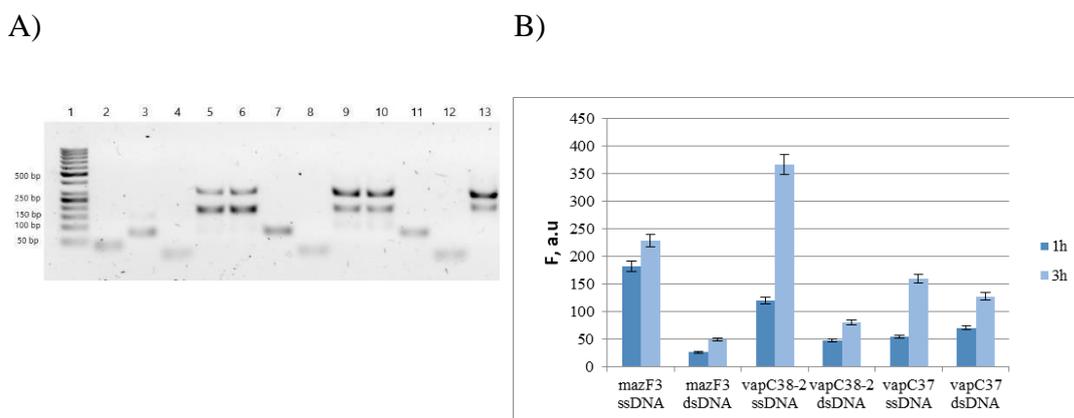


Рис. 4. А) Собранные ДНК-наномашин в агарозном геле: 1 – маркер ДНК от 50 п.н., 2 – T1; 3 – T2 ДНК-наномашин mazF3; 4 – T3 наномашин mazF3; 5, 6 – ДНК-наномашин mazF3; 7 – T2 ДНК-наномашин vapC37; 8 – T3 ДНК-наномашин vapC37; 9, 10 – ДНК-наномашин vapC37; 11 – T2 ДНК-наномашин vapC38-2; 12 – T3 ДНК-наномашин vapC38-2; 13, 14 – ДНК-наномашин vapC38-2. Образцы анализировали в 1,5% агарозном геле при 130 В в течение 40 минут с окрашиванием бромидистым этидием. Б) Данные флуоресцентного анализа ДНК-наномашин

Было обнаружено, что ДНК-наномашина имеет примерно тот же LOD 30 пМ (после 60-минутного анализа) с ssДНК, что и для ViDz. Однако наблюдается отсутствие сигнала флуоресценции ViDz с dsДНК, в то время как ДНК-наномашина способна детектировать 20 нМ ампликона после 1 часа инкубации и 1 нМ после 3 часов. Мы полагаем, что можно добиться еще более низкого значения LOD путем дальнейшей оптимизации конструкции ДНК-наномашин.

Затем мы проверили способность ViDz и ДНК-наномашин дифференцировать ампликоны, содержащие SNP систем TA типа II. Сайты SNP локализованы в месте комплементарного связывания аналит-связывающей руки цепи DzA. Сенсор vapC38-2 детектировал соответствующий синтетический аналит с самым высоким фактором селективности (~ 76%) среди исследованных сенсоров (рис. 5).

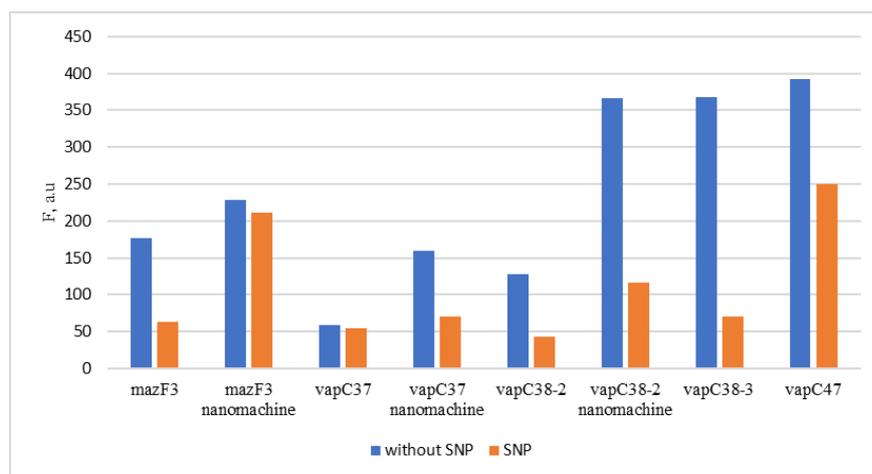


Рис. 5. Селективность ViDz и ДНК-наномашин. Фактор селективности составил 70%, 10%, 10%, 68%, 73%, 74%, 88%, 39% для mazF3, vapC37, vapC38-2 ViDz и ДНК-наномашин соответственно

Как и ожидалось, исследование продемонстрировало способность ДНК-наномашин детектировать dsДНК благодаря облегченной доставке F-sub и усиленной гибридизации аналит-ДНК-наномашина с помощью трех коротких аналит-связывающих рук, в то время как ViDz, напротив, не обладают указанными признаками. Помимо уже разработанных сенсоров, мы работаем над следующими ДНК-наномашинами для генов TA системы II типа vapC47, vapC37, vapC38-2 и vapC38-3, для полноценной идентификации всех девяти основных генотипов из схемы типирования штаммов MtV.

Литература

1. Лазарева И.В., Старкова П.С., Агеевец В.А., Волкова М.О., Лебедева М.С., Навачкая А.С., Мясникова Е.Б., Митрошина Г.В., Сидоренко С.В. Оценка распространения ректального носительства генов вирулентности и карбапенемаз у пациентов, поступивших на плановую госпитализацию // Антибиотики и химиотерапия. 2018. Т. 63. № 11-12. С. 17-22.
2. Старкова П.С., Лазарева И.В., Сидоренко С.В., Мартенс Э.А. Комбинации авибактама с бета-лактамами: на сколько реально их использование для эмпирической терапии? / Старкова П.С., Лазарева И.В., Мартенс Э.А., Сидоренко С.В. // Проблемы медицинской микологии. 2018. Т. 20, № 2. С. 116-117.

3. Старкова П.С., Колпашников Д.М. ДЕТЕКЦИЯ ДВУХЦЕПОЧЕЧНОЙ ДНК MYCOBACTERIUM TUBERCULOSIS С ПОМОЩЬЮ ДНК-НАНОМАШИН // Сборник тезисов докладов Пятой Междисциплинарной конференции «Молекулярные и Биологические аспекты Химии, Фармацевтики и Фармакологии». 2019. Вып. 5. С. 232.
4. Старкова П.С. Детекция двухцепочечной ДНК Mycobacterium tuberculosis с помощью ДНК-наномашинок // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019» [Электронный ресурс]. 2019.
5. Старкова П.С., Лазарева И.В., Агеевец В.А., Волкова М.О., Лебедева М.С., Навачкая А.С., Мясникова Е.Б., Митрошина Г.В., Сидоренко С.В. Оценка распространения ректального носительства генов вирулентности и карбапенемаз у пациентов, поступивших на плановую госпитализацию в один из специализированных стационаров Санкт-Петербурга // Проблемы медицинской микологии. 2019. Т. 21. № 2. С. 132-133
6. Breaker R.R. A DNA enzyme that cleaves RNA / GF Joyce G.F., R.R. Breaker // Chem Biol. 1994. 1(4). С. 223-229.
7. Liu J. Functional Nucleic Acid Sensors / J. Liu, Z. Cao, Y. Lu // Chem Rev. 2009. 109(5). С. 1948-1998.
8. Mokany E. MNazymes, a versatile new class of nucleic acid enzymes that can function as biosensors and molecular switches / E. Mokany, S.M. Bone, P.E. Young, T.B. Doan, A.V. Todd // J Am Chem Soc. 2010. 132(3). С. 1051-1059.
9. Gerasimova Y.V. Expedited quantification of mutant ribosomal RNA by binary deoxyribozyme (BiDz) sensors / Gerasimova Y.V., Yakovchuk P., Dedkova L.M., Hecht S.M., Kolpashchikov D.M. // RNA. 2015. 21(10). С. 1834-1843.
10. Cox A.J. DNA Antenna Tile-Associated Deoxyribozyme Sensor with Improved Sensitivity / Cox A.J., Bengtson H.N., Gerasimova Y.V., Rohde K.H., Kolpashchikov D.M. // ChemBioChem. 2016. 17(21). С. 2038-2041.



Тхоржевский Иван Леонидович
Факультет Низкотемпературной энергетики
E-mail: tkhorzhevskiy.ivan.l@gmail.com

РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИЛИЦИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.Л. Тхоржевский

Научный руководитель – доцент, к.т.н. А.В. Новотельнова

Ключевые слова

Бросовое тепло, термоэлектричество, альтернативная энергетика, экологически чистые материалы, наноструктурированные материалы, силициды, силицидные материалы, термоэлектродгенераторы.

Цель проекта – создание надежных, механически прочных, термоэлектрических генераторов (ТЭГ) на основе силицидных материалов для их применения в оборудовании, работа которого сопряжена с выделением бросового тепла, увеличения присутствия и повышение конкурентоспособности термоэлектрических генераторов промышленности, с их сопутствующим развитием.

Изделие может применяться в системах охлаждения, отвода отработавших выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, системах охлаждения и отвода тепла. Модули с большей площадью поверхности способны преобразовывать пропорционально большее количество тепловой энергии [1].

На сегодняшний день основной проблемой создания силицидных ТЭГ является недостаточная механическая прочность таких генераторов в процессе эксплуатации [3]. Это обусловлено тем, что в ТЭГ используются ветви *n*- и *p*-типа проводимости, представляющие собой разные материалы: твердые растворы на основе силицида и станнида магния (*n*-ветвь термоэлемента) и высшие силициды марганца (ВСМ) (*p*-ветвь термоэлемента).

Эти материалы потенциально способны привести к достижению максимальной эффективности и мощности устройства [4]. Однако, они имеют разные коэффициенты теплового расширения и разные механические характеристики. В диапазоне рабочих температур модуль Юнга твердых растворов Mg (Si, Sn) почти в два раза ниже модуля Юнга ВСМ (порядка 80 ГПа против 160 ГПа). При этом, коэффициент теплового расширения материалов на основе твердых растворов Mg (Si, Sn) выше на величину от 15 до 44 % в зависимости от температуры. Таким образом, во время приложения тепловой нагрузки происходит неравномерное расширение и формирование неравномерного напряженного состояния в ответ на внешние и внутренние деформации [2].

Для решения этой проблемы необходимо произвести подбор материала/группы материалов для припоя, применяемого для создания контактов между ветвями термоэлемента и медными пластинами. Выбранный материал должен обладать достаточной механической упругостью, чтобы поглощать локальные механические напряжения.

Другой метод состоит в согласовании сечений и высот термоэлектрических ветвей. Одинаковые геометрические параметры ветвей, применяемые в коммерчески доступных модулях, не являются оптимальными и не подходят для силицидных ТЭГ.

Апробация методов возможна с использованием численного 3D моделирования термоэлемента в среде Comsol Multyphysics. На рис. 1 представлено схематическое изображение модели термоэлемента, используемого в разработке ТЭГ. Состав, геометрические размеры ТЭГ приведены в таблице. Геометрические размеры деталей термоэлементов выбраны в соответствии с существующими коммерческими образцами [5].

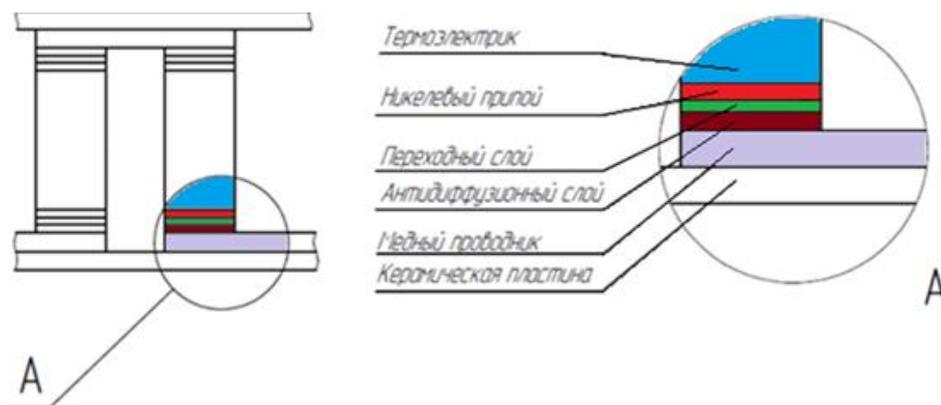


Рис. 1. Схематическое изображение модели термоэлемента

Таблица

Состав модуля разрабатываемого ТЭГ

№	Составные части модуля	Назначение	Основные технические характеристики
1	Термоэлектрические ветви	Преобразование тепловой энергии в электрическую	Материал – MgSi (для ветвей n-типа) и MnSi (для ветвей p-типа), соединены в каскады медным проводником Высота 10 мм, сечение 5x5 мм
2	Керамические пластины	Механическая фиксация термоэлементов, передача тепла от источника	Материал Al ₂ O ₃ . Высота 0,65 мм, сечение 38,5x37 мм
3	Контактная группа	Передача электрической энергии в нагрузку	Медные пластины высотой 0,25 мм и сечение 5x24 мм
4	Антидиффузионный никелевый слой	Предотвращает диффузию между силицидным материалом и медными пластинами	Тонкие (не более 600 мкм) пластины, выполненные из Ni
5	Припой	Соединение ветвей термоэлемента с медными пластинами	Припой с температурой плавления свыше 900 С и достаточной электро- и теплопроводностью и механическими характеристиками

Результаты, полученные в ходе моделирования физических процессов дают представление о механических нагрузках в модуле в ходе его нагрева и функционирования на рабочих температурах (около 400°C):

- напряжения и токи, мощность термоэлемента, а также значения данных величин при различных составах и геометрических размерах ветвей;
- распределение температуры внутри термоэлементов.

На рис. 2 и 3 отражены кривые зависимости КПД (рис. 2) и мощности (рис. 3) от величины нагрузки при температурах 170°C (ряд 1) 220 °C (ряд 2) и 270 °C (ряд 3)

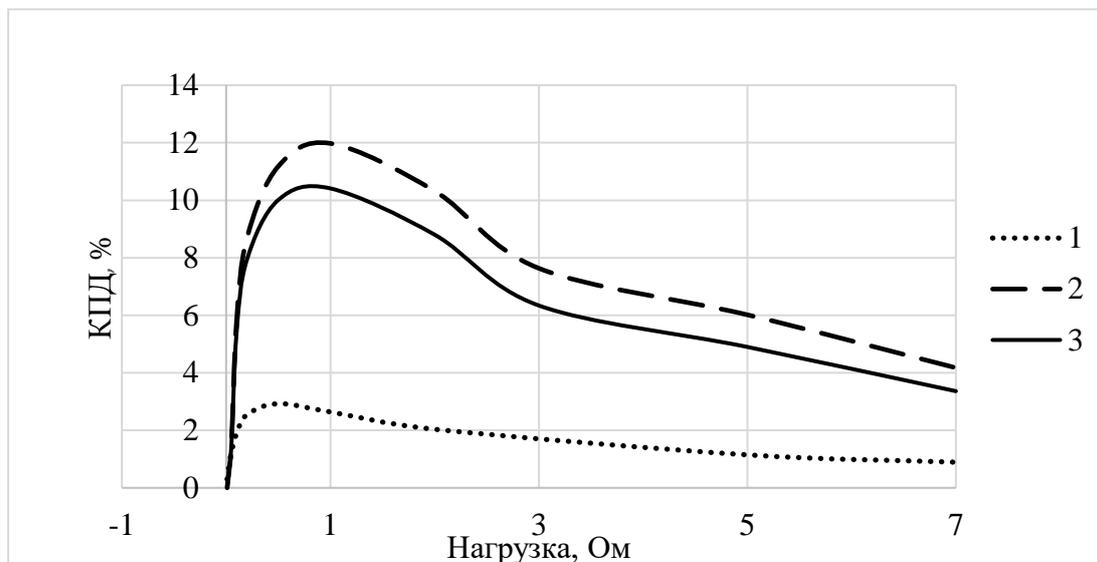


Рис. 2. Зависимость КПД от величины нагрузки

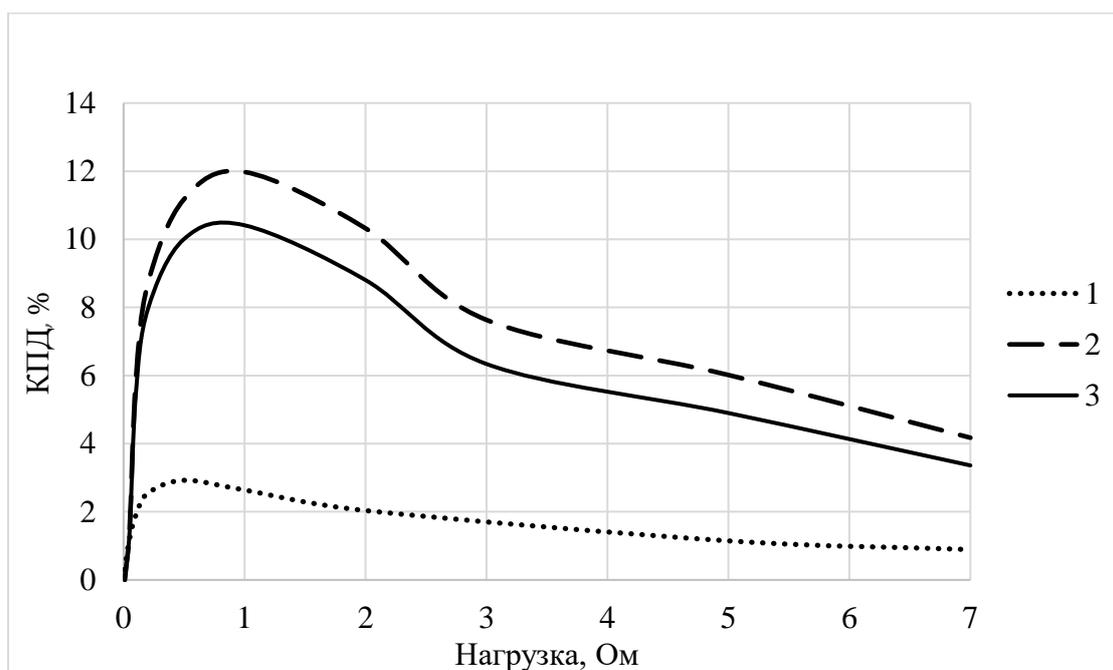
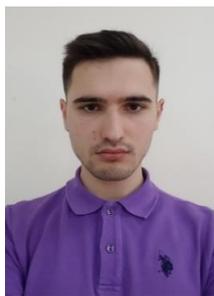


Рис. 3. Зависимость Мощности от величины нагрузки

Анализ полученных результатов, позволит изучить влияние диффузионных процессов в переходных слоях модуля. Используя результаты моделирования можно производить оптимизацию геометрических параметров элементов модуля для достижения желаемых характеристик.

Литература

1. Полупроводниковые термоэлементы Иоффе А.Ф. 1960.
2. Nakamura T., Hatakeyama K., Minowa et al. *Journal of Elec Materi* (2015) 44: 3592. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3910-6>.
3. Skomedal, Gunstein & Holmgren, Lennart & Middleton, Peter & Eremin I.S. & Isachenko, G & Jaegle, Martin & Tarantik, Karina & Vlachos, Nikolas & Manoli, Maria & Kyratsi, Theodora & Berthebaud, David & Y. Dao Truong, Nhi & Gascoin, Franck. (2016). Design, assembly and characterization of silicide-based thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*. 110. 13-21. 10.1016/j.enconman.2015.11.068.
4. Amin Nozariasbmarz et al 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* 56 05DA04 <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.05DA04>.
5. [Электронный ресурс]. Режим доступа свободный, язык – русский: <http://kryothermtec.com/ru/low-temperature-generating-modules.html>.



Чупров Сергей Сергеевич
Факультет Безопасности информационных технологий
E-mail: chuprov@itmo.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОЕЗДА ПЕРЕКРЁСТКОВ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ В РАМКАХ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С.С. Чупров

Научный руководитель – доцент И.И. Комаров

Аннотация

Работа посвящена исследованию алгоритмов безопасного информационного взаимодействия между элементами кибер-физических систем в контексте управления движением беспилотных транспортных средств на перекрёстке в рамках парадигмы умного города. В результате работы была предложена модель организации безопасного движения беспилотных транспортных средств на перекрёстке, позволяющая повысить пропускную способность перекрёстка в рамках проведённых симуляций. Задачей для будущих исследований является разработка физической модели перекрёстка и моделей беспилотных транспортных средств с помощью доступных компонентов для проведения симуляций на реальных физических объектах.

Ключевые слова

Мобильная робототехническая система, беспилотное транспортное средство, информационная безопасность, перекрёсток.

Введение

Перепополненность городов автомобилями создаёт множество проблем для жителей крупных мегаполисов – от выбросов вредных веществ в атмосферу до ежегодно растущей смертности в дорожно-транспортных происшествиях. Последние достижения в области искусственного интеллекта и организации движения беспилотных транспортных средств (БТС) уже сегодня позволяют создавать концепции, которые могут стать повсеместными в ближайшем будущем.

В данной работе рассматриваются возможности создания интеллектуальной транспортной инфраструктуры (ИТС) в рамках концепции умного города с использованием кибер-физических систем (КФС). Рассматриваются аспекты информационной безопасности (ИБ) при организации информационного взаимодействия между элементами КФС, обсуждаются подходы к решению задач управления перекрестками.

Таким образом, целью работы является разработка модели организации безопасного движения БТС при проезде городских перекрёстков. Решаемыми для достижения цели задачами определены:

- анализ существующих научных исследований в области организации движения беспилотного транспорта на перекрёстке;
- разработка теоретико-множественной модели организации безопасного движения БТС на перекрёстке;

- разработка программного симулятора для оценки целесообразности предлагаемой модели;
- разработка физического стенда для проведения имитационного моделирования.

Предпосылки к внедрению беспилотного транспорта

В современном мире сложно представить свою жизнь без автомобиля. Технологический прогресс и развитие производства сделали автомобили крайне доступными. По статистике Европейской Ассоциации Автопроизводителей (АСЕА), с 2012 по 2016 годы продажи пассажирских автомобилей на европейском рынке увеличились на 5,8% и это число продолжит расти в ближайшие годы [1]. Статистика этой же организации по типу топлива, используемого в автомобилях, реализуемых на европейском рынке, не менее утешительна – более 96% автомобилей в качестве источника энергии используют бензин или дизель [1].

Статистика смертности в дорожно-транспортных происшествиях также не утешительна – по данным ассоциации безопасных дорожных путешествий [2], более 1,25 миллиона человек в мире ежегодно погибает в дорожно-транспортных происшествиях и от 20 до 50 миллионов получают травмы или остаются инвалидами. Согласно прогнозам, к 2030 году дорожно-транспортные происшествия в списке главных причин смертности займут пятое место [2].

Перечисленные выше проблемы заставляют общество искать для них решения. Одним из таких решений может быть внедрение беспилотного транспорта и развитие ИТС.

Анализ существующих подходов к организации движения беспилотных транспортных средств на перекрёстке

Создание и внедрение ИТС направлено на немедленное решение комплекса проблем, с которыми сталкиваются жители мегаполисов. К таким проблемам относятся пробки, низкая пропускная способность городских улиц, смертность на дорогах, загрязнение окружающей среды и т. д. В рамках города перекрестки вызывают особые проблемы, поскольку существует необходимость в регулировании движения транспортных средств, движущихся с разных направлений, траектории которых могут пересекаться. Необходимо правильно предоставлять приоритеты и регулировать движение транспортных средств таким образом. В контексте построения ИТС это можно сделать с минимальными затратами времени и ресурсов. Для решения этой задачи многие современные научные исследования рассматривают возможность создания системы, способной с помощью беспроводной связи в реальном времени обмениваться данными с БТС и строить оптимальные маршруты для увеличения пропускной способности городских перекрестков. Целью такой системы является обеспечение оптимального и безопасного проезда перекрёстка несколькими БТС. Обзор некоторых исследований в этой области приведен ниже.

Дрезнер и Стоун в серии работ [3-8] рассматривают проблему управления движением на перекрёстке с точки зрения мульти-агентного подхода. В своих работах авторы предложили разделить участников дорожной инфраструктуры на агентов-транспортных средств (VA) и агентов бронирования (RA), которые обеспечивают динамическое управление ситуацией на перекрестке. Для маневрирования на перекрестке VA должен отправить запрос RA, чтобы зарезервировать для себя определенный участок дороги, по которому VA будет двигаться в определенный момент времени. Эксперименты, проведенные с использованием программного симулятора, показали, что этот подход значительно превосходит светофор в рамках увеличения

пропускной способности перекрестка. Основываясь на своих исследованиях, авторы предложили протокол связи, описывающий обмен данными между VA и RA. В дальнейших исследованиях авторы рассмотрели возможность введения в систему водителей-людей и внедрения аварийных транспортных средств, которые имеют приоритет над другими участниками дорожного движения. Подробное описание исследований и экспериментов, проведенных авторами, можно найти в [9].

Более полный обзор исследований, экспериментов и существующих систем управления движением на перекрестках можно найти в [10]. Авторы подробно описывают способы планирования маршрутов и коммуникации между агентами, системы предотвращения столкновений, обсуждают способы учета реальных водителей и пешеходов в качестве участников дорожного движения в таких системах. Также в работе рассматриваются реальные проекты, которые реализуются в разных странах для повышения эффективности транспортной инфраструктуры.

Модель организации движения беспилотных транспортных средств на перекрёстке

Предлагаемая модель включает в себя множество БТС: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ и множество объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ): $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$. Каждый ОТИ расположен на отдельном перекрестке и имеет возможности взаимодействовать со всеми БТС, в то же время БТС v_j может взаимодействовать только с одним ОТИ i_h . Общая площадь перекрестка разделена на небольшие участки местности – элементарные секции и может быть представлена как сумма $S = s_1 + s_2 + \dots + s_k$, где $s_i, i \in [1, k]$ площадь i -ой элементарной секции. Определено два варианта состояний элементарных секций на перекрестке:

- $s_i \cap s_j = \emptyset, i \neq j$.
- $s_i \cap s_j \neq \emptyset, i \neq j$.

В рамках данного исследования время t_v , затраченное БТС на преодоление маршрута должно стремиться к минимуму: $t_v \rightarrow \min$.

Соседние ОТИ обмениваются друг с другом информацией о загруженности перекрестка в данный момент времени, и о маршрутах БТС, на основании этих данных текущий ОТИ, на перекрёсток которого планирует прибыть v_i -ый БТС, строит для него оптимальный маршрут.

Для достижения поставленной цели были определены критерии функционирования системы, проиллюстрированные в формуле (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{waiting} \rightarrow \min \\ speed_i^{factual} \rightarrow speed_i^{expected}, i \in [1, n] \\ \sum_{u=1}^U s_{occ_u} \rightarrow \min \\ t_{intersection_i} \rightarrow \min, i \in [1, n] \\ t_{route_i} \rightarrow \min, i \in [1, n] \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $n_{waiting}$ – количество БТС, собирающиеся совершить проезд через перекресток, $speed_i^{factual}$ – фактическая скорость i -го БТС, $speed_i^{expected}$ – ожидаемая (идеальная) скорость i -го БТС, s_{occ_u} – количество занятых элементарных секций, u – общее количество элементарных секций на перекрестке, $t_{intersection_i}$ – время проезда i -го БТС через перекресток, t_{route_i} – общее время, затраченное i -м БТС на преодоление маршрута.

Таким образом, БТС и ОТИ выполняют взаимозависимые функции. Транспортные средства собирают данные о своем техническом состоянии и движении, данные о траектории движения других БТС и передают их на ОТИ, хранят расположение дорог, по которым проходит маршрут. ОТИ хранят информацию о системе, разрабатывают локальные и глобальные оптимальные планы движения БТС по городу, контролируют ситуацию на отдельном перекрестке и обмениваются информацией с другими ОТИ.

Проведение имитационного моделирования с помощью разработанного программного симулятора и результаты

Для оценки эффективности предложенной модели был разработан программный симулятор, имитирующий движение БТС в городе, в частности их взаимодействие на перекрестках. Были определены следующие требования к виртуальному полигону:

- расположение и статусы всех элементарных секций известны всем участникам дорожного движения;
- начало дороги должно быть расположено на одной из границ виртуального полигона, в то время как ее конец должен быть расположен на противоположной стороне, то есть предполагается, что есть только прямые дороги, координаты которых совпадают с координатами элементарных секторов, расположенных в той же строке или столбце;
- любая из дорог может быть либо горизонтальной, либо вертикальной (углы всех пересечений проезжих частей строго прямые).

Далее были определены следующие условия экспериментов:

- БТС могут двигаться только в направлениях, изначально заданных проезжими частями;
- территория полигона для движения БТС ограничена размерами полигона;
- количество БТС, одновременно находящихся на территории полигона ограничено количеством элементарных секций, которыми определяется территория полигона;
- в случае, если на одну элементарную секцию претендует одновременно несколько БТС, предпочтение отдается тому БТС, который раньше отправил запрос на проезд через перекресток;
- в случае одновременного получения запроса от нескольких БТС на проезд перекрестка, решение по отношению очередности проезда принимается ОТИ, в соответствии с критериями оптимальности.

Как было указано выше, с целью оценки эффективности представленной модели, в симулятор была добавлена функция управления движением на перекрестке с помощью светофоров. Среднее время пересечения перекрестка отдельным БТС было взято за критерий оценки эффективности используемой модели. Было проведено три группы экспериментов, по 1000 запусков в каждой, с различной вероятностью P появления нового БТС в очередную дискрету времени на перекрестке: $P = 1$ (как минимум одно БТС появляется на перекрестке), $P = 0.5$, $P = 0.2$. Длительность каждого отдельного запуска – 1000 дискретных единиц времени.

В результате, после обработки полученных данных каждого эксперимента и сравнительного анализа, данные приняли вид, представленный в таблице. Исходя из полученных результатов, представленная авторами данного исследования модель управления движением БТС на перекрестке позволяет в среднем снизить время проезда БТС через перекресток на 21%.

Описание стенда для проведения имитационного моделирования на реальных физических моделях и задач для дальнейших исследований

С целью оценки целесообразности использования предложенной модели планируется дальнейшая разработка физической модели перекрёстка и моделей беспилотных транспортных средств с помощью доступных компонентов.

Эксперименты, проведённые с помощью программного симулятора, позволяют сказать о том, что, в общем случае, пропускная способность перекрёстка увеличивается по сравнению с использованием светофоров в качестве инструмента организации трафика. Однако, в силу специфических особенностей КФС, их привязанности и зависимости от внешней среды реального мира, имитационное моделирование на реальных физических объектах видится надёжным способом оценки поведения системы при наличии внешней среды (таблица).

Появление таких проектов, как Duckietown [11], позволяет говорить о том, что мобильные робототехнические системы могут быть эффективно использованы для тестирования защищённости и алгоритмов управления умным городом.

Схема физической модели перекрёстка изображена на рисунке.

Таблица

Зависимость среднего времени, затраченного БТС на проезд перекрёстка от вероятности появления нового БТС при разных схемах управления движением

Система управления перекрёстком	Вероятность появления нового БТС на перекрёстке (P)		
	0,2	0,5	1
	Среднее время, затраченное БТС на преодоление перекрёстка		
Светофоры	7,856	8,272	8,905
Разработанная модель	6,197	6,543	7,149

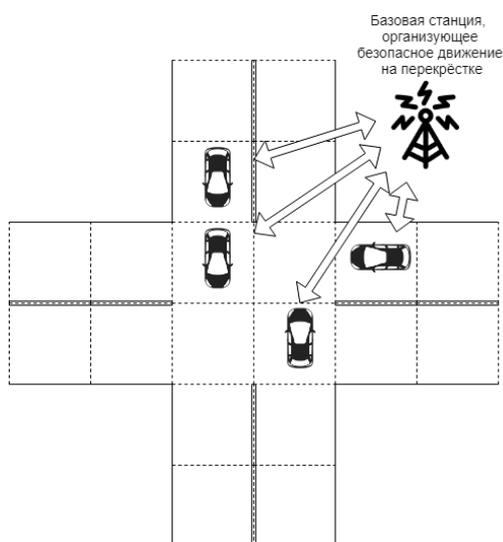


Рисунок. Схематичное изображение физической модели перекрёстка

Логика поведения агентов, распределение приоритетов и маршрутов соответствует описанной в работе модели.

В качестве мобильной платформы для моделей БТС планируется использовать доступное готовое решение, с установкой вычислительного устройства и модуля связи. В качестве вычислительного устройства планируется использование Raspberry Pi 3. В качестве модуля связи планируется использование датчика nRF24L01+. Преимуществами данного модуля является низкое потребление энергоресурсов, малый размер, высокая дальность передачи данных (до 1000 м), возможность организовывать устройства в сети типа «звезда», доступность.

Для ОТИ (базовой станции) планируется использовать такие же вычислительное устройство и модуль связи.

Заключение

В настоящей работе кибер-физические системы рассматриваются в качестве основного компонента интеллектуальной транспортной системы. Перекрестки в мегаполисах являются генераторами пробок и заторов на дорогах, традиционные методы управления движением на них, такие как светофоры, не смогут справиться с задачей увеличения пропускной способности перекрестка в рамках концепции умного города. Однако, с появлением беспилотных транспортных средств и систем управления, которые позволяют им эффективно и безопасно организовывать свое движение, стало возможным значительно повысить эффективность городских перекрестков. С целью решения проблемы, в работе была предложена модель организации безопасного движения беспилотных транспортных средств на городском перекрестке. Для определения целесообразности представленной модели был разработан программный симулятор отдельного перекрестка, управляемый на основе разработанной модели. Для сравнения эффективности представленной модели в симулятор была добавлена функция организации движения на перекрестке с помощью светофоров. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что представленная модель позволяет увеличить пропускную способность перекрестка по сравнению с использованием светофоров в контексте данного исследования.

Задачей для будущих исследований определены разработка физической модели перекрестка и моделей беспилотных транспортных средств, организация поведения и взаимодействия объектов системы в соответствии с предложенной в работе моделью и проведение испытаний в реальных, не идеальных условиях.

Литература

1. Report: Vehicles in use - Europe 2018 [Электронный ресурс] // European Automobile Manufacturers' Association official website, 2018. URL: <https://www.acea.be/statistics/article/report-vehicles-in-use-europe-2018> (дата обращения: 10.05.2019).
2. Road Safety Facts [Электронный ресурс] // Association for Safe International Road Travel official website, 2018. URL: <https://www.asirt.org/safe-travel/road-safety-facts/> (дата обращения: 10.05.2019).
3. Dresner K., Stone P. Multiagent traffic management: A reservation-based intersection control mechanism // Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2. IEEE Computer Society, 2004. С. 530-537.

4. Dresner K., Stone P. Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism //Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. ACM. 2005. С. 471-477.
5. Dresner K., Stone P. Human-usable and emergency vehicle-aware control policies for autonomous intersection management //Fourth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT), Hakodate, Japan. 2006.
6. Dresner K., Stone P. Traffic intersections of the future //Proceedings of the national conference on artificial intelligence. – Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press; MIT Press; 1999, 2006. Т. 21. №. 2. С. 1593.
7. Dresner K., Stone P. Multiagent traffic management: Opportunities for multiagent learning //International Workshop on Learning and Adaption in Multi-Agent Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. С. 129-138.
8. Dresner K., Stone P. Learning policy selection for autonomous intersection management //Pro. AAMAS. 2007. С. 34-39.
9. Dresner K., Stone P. A multiagent approach to autonomous intersection management //Journal of artificial intelligence research. 2008. Т. 31. С. 591-656.
10. Chen L., Englund C. Cooperative intersection management: A survey //IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. Т. 17. №. 2. С. 570-586.
11. Our mission [Электронный ресурс] // Duckietown official website, 2019. URL: <https://www.duckietown.org/about/mission> (дата обращения: 10.05.2019).

**ПОБЕДИТЕЛИ КОНКУРСА ГРАНТОВ ПРАВИТЕЛЬСТВА
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА СРЕДИ АСПИРАНТОВ
УНИВЕРСИТЕТА ИТМО**



Аксенова Ольга Игоревна
Факультет Пищевых биотехнологий и инженерии
E-mail: oksi280491@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУДЕРА С ДИНАМИЧЕСКИМ ФОРМУЮЩИМ УЗЛОМ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО И ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

О.И. Аксенова

Научный руководитель – профессор Г.В. Алексеев

Аннотация

Статья посвящена разработке конструкции одношнекового экструдера с динамическим формующим узлом, на основании установленной эмпирически кинетики процесса экструзии смесей из сырья растительного и животного происхождения. Актуальность разработанной конструкции для Санкт-Петербурга и Ленинградской области заключается в решении вопроса импортозамещения технологически сложного оборудования и зависимости от иностранных сервисных специалистов, экономически выгодной для региона утилизации побочных продуктов переработки лососевых рыб и пивоваренных производств, снижения производственных издержек предприятий-производителей экструдатов при модернизации эксплуатируемых технологических линий.

Ключевые слова

Экструзия, одношнековый экструдер, сборный шнек, динамический узел формования, конструкционные параметры, импортозамещение оборудования.

Основной технологической машиной при производстве экструдированных продуктов питания является экструдер. Как показал анализ, большинство предприятий, производящих экструдаты на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области используют импортное экструзионное оборудование, что позволяет получать высококвалифицированную техническую поддержку, надежную и безотказную работу оборудования с длительным сроком эксплуатации, однако, цена обслуживания и самого комплекса оборудования высока. При этом в настоящее время в виду действия санкций у производителей экструдатов, использующих импортное оборудование, наблюдается снижение объема производства на 3,2% из-за уменьшения объема закупок импортного оборудования и комплектующих к нему, а также затруднения в оказании сервисного обслуживания зарубежными специалистами. Производство отечественной экструзионной техники сосредоточено в Санкт-Петербурге, наиболее известными фирмами-производителями экструзионного оборудования являются компании «Арсенал», «Апрель», «ВЭС», «Алмаз». Однако, в сравнении с зарубежным оборудованием, большинство из этих экструдеров имеет однотипные конструкции и схожие технические характеристики. Проведение производственного эксперимента для внедрения нового вида продукта и отработки технологических режимов производства на данном оборудовании практически невозможно [1, 2].

Актуальность исследования состоит в разработке на основе эмпирических исследований конструкции экструдера с динамическим формующим узлом, которая позволит снизить время на производство и улучшить качество готового продукта за счет достижения требуемой глубины физико-химических превращений вследствие термомеханической обработки; обеспечить стабильную и надежную работу за счет упрощенной конструкции динамического формующего узла, легкость его обслуживания; расширить ассортимент выпускаемой на одном экструдере продукции и технологические возможности экструдера по производству закусочных продуктов различного поликомпонентного состава из сырья растительного и животного происхождения; обеспечить переработку побочных продуктов пищевых производств, в том числе побочных продуктов пивоваренных производств и переработки лососевых рыб, образующихся и экономически невыгодно утилизируемых в Ленинградской области в большом количестве. Актуальность данного направления подтверждается приказом №2722 от 16.08.2017 «Об утверждении отраслевого плана мероприятий по импортозамещению в отрасли машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации...».

Цель работы: научно обоснованная разработка конструкции экструдера для переработки сырья растительного и животного происхождения.

В соответствии с целью решались следующие задачи:

- Анализ экструзионной техники и технологии, в том числе используемых для производства экструдированных продуктов питания на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области.
- Эмпирическое исследование влияния конструкционных параметров экструдера на технологические параметры процесса экструзии рецептурной смеси.
- Разработка конструкции одношнекового экструдера для динамической экструзии пищевых продуктов, в частности закусочных продуктов.

Влияние конструкционных параметров рабочих органов экструдера на кинетику процесса экструзии исследовали на экспериментальной установке, состоящей из одношнекового экструдера КЭШ-2, контрольно-измерительного оборудования и персонального компьютера. Была проведена серия экспериментов при рациональных параметрах процесса, по результатам протоколов которой были установлены следующие зависимости: температуры, давления и влажности рыборастворительной смеси по длине рабочей камеры, температуры и давления рыборастворительной смеси от расстояния между конусами шнека и матрицы при различном диаметре формующего канала, массовой производительности и потребляемой мощности от частоты вращения шнека при разных конфигурациях шнека, удельной механической энергии от массовой производительности и частоты вращения шнека. Полученные зависимости отражают изменение характера процесса экструзии от конструкционных параметров рабочих органов, не противоречат теоретическим основам экструзионного процесса [3, 4] и позволяют с достаточной точностью прогнозировать их изменение в исследованном диапазоне значений факторов.

В результате анализа современных конструкций экструдеров и проведенных эмпирических исследований была разработана конструкция экструдера для переработки многокомпонентных смесей (заявка на изобретение № 2019119323 "Экструдер", от 19.06.2019), схема которого приведена на рис. 1. Экструдер состоит из станины 3, привода, камеры измельчения и экструдерной части. Электродвигатель 1, на котором установлен тиристорный регулятор 2, расположен внутри глухой станины 3 и соединен по средствам клиноременной передачи 4 с экструдерной частью. Экструдерная часть состоит из загрузочного патрубка 8, питающего 7 и прессующего 6 корпусов, образующих в сборе камеру прессования, наборных шнековых элементов, насаженных

на вал, диска 10 и матрицы 9, образующих в сборе динамический формующий узел (рис. 2), подшипникового узла 5 с двумя подшипниками, шкива клиноременной передачи 4. Камера измельчения, в которой протекают процессы подачи, измельчения и увлажнения сырья, состоит из загрузочного бункера 18, загрузочного патрубка 8, приемного бункера 19, лотка 23, механизма передвижения лотка 27, ножа 22, регулировочной гайки 24 и распылительных форсунок 26.

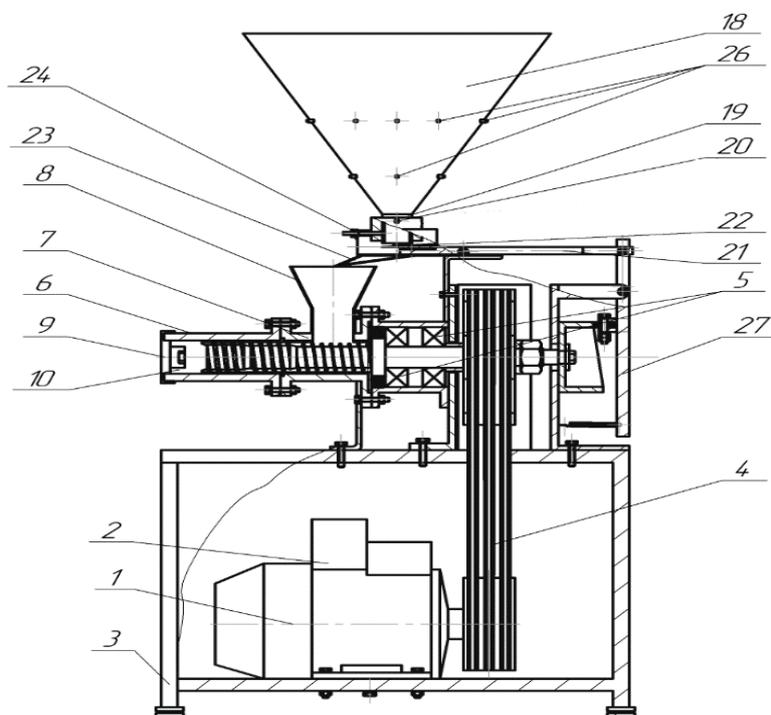


Рис. 1. Одношнековый экструдер с динамическим формующим узлом:

- 1 – электродвигатель, 2 – тиристорный регулятор, 3 – станина, 4 – клиноременная передача, 5 – подшипниковый узел, 6 – прессующий корпус, 7 – питающий корпус, 8 – загрузочный патрубок, 9 – матрица, 10 – диск шнека, 18 – загрузочный бункер, 19 – приемный бункер, 20 – регулирующий винт, 21 – рычаг, 22 – нож, 23 – лоток, 24 – регулировочная гайка, 26 – форсунки, 27 – механизм передвижения лотка

Регулирование зазора между приемным бункером 19 и ножом 22, осуществляемое винтом 20, позволяет перерабатывать в экструдере как цельное или дробленое зерно различных зерновых культур, имеющих зерна различной формы и размера, так и мелкую крупку или порошки. Распылительные форсунки 26, расположенные по окружности в два ряда, предназначены для мелкодисперсного распыления влаги с целью достижения требуемого уровня влажности и его стабилизации в сырье и/или распыления витаминных добавок [3]. Продукт, поступаая через загрузочный патрубок 8 в питающий корпус 7, продвигается внутри камеры прессования от загрузочного отверстия к матрице по направляющим в виде трапецеидальных канавок 17. На валу со стороны экструдерной части установлены наборные шнековые элементы, представленные подающим, промежуточным и прессующим шнековыми элементами, между которыми установлены прессующие кольца. Шнековые элементы, установленные на вал, образуют шнеки двух конфигураций: первая – однозаходный шнек с постоянным шагом нарезки витка, увеличивающейся шириной гребня и переменной глубиной нарезки, при этом глубина нарезки витка на каждом последующем шнековом элементе уменьшается; вторая – однозаходный шнек с уменьшающимся шагом нарезки и увеличивающейся шириной гребня витка. Уменьшение глубины нарезки витка обеспечивает сокращение кольцевого

зазора между стенками прессующей камеры и гребнями витков шнека и, следовательно, увеличение интенсивности тепломеханической обработки. Таким образом, выбирая конфигурацию шнека, возможно, регулировать и достигать требуемой глубины термомеханической обработки для получения готового продукта высокого качества, исходя из вида сырья растительного или животного происхождения или их соотношения в рецептурной смеси. Диск 10 имеет четыре цилиндрических формующих канала равного диаметра, расположенные симметрично и равноудалено от центральной оси, при этом со стороны загрузки каналы имеют входные полости переменного сечения (расширяющуюся коническую часть под 45°), которые уменьшают противодействие расплаву биополимера. Цилиндрическая матрица 9 может быть выполнена с четырьмя, восьмью или шестнадцатью отверстиями, расположенными равноудаленно и симметрично относительно центральной оси цилиндра. Разное количество отверстий позволяет варьировать скорость срезания впрессовываемого шарика экструдата. Матрица имеет отверстия различной конфигурации, для формования изделий различных форм – от шариков до палочек [3, 5]. Матрица 9 крепится к внешней поверхности прессующего корпуса 6 экструдера на резьбу. Регулируя глубину закручивания матрицы на прессующий корпус экструдера, можно регулировать зазор между матрицей 9 и диском 10, подстраиваясь под технологические режимы в зависимости от свойств перерабатываемого сырья. Предлагаемая конструкция динамического формующего узла экструдера позволяет вырабатывать экструдаты без отдельной стадии измельчения, а также перерабатывать сырье повышенной влажности при давлении в предматричной зоне 4,5–5 МПа и температуре не более 180°C .

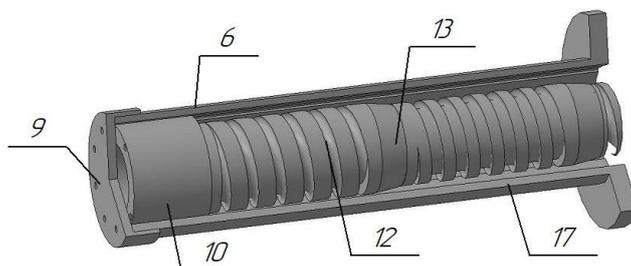


Рис. 2. Формующий узел экструдера

6 – прессующий корпус, 9 – матрица, 10 – диск, 12 – прессующий шнек,
13 – прессующие кольца, 17 – трапециевидные канавки корпуса

Таким образом, использование предлагаемой конструкции экструдера позволяет: расширить ассортимент выпускаемой на одном экструдере продукции, за счет использования матриц с разным количеством и формой отверстий и шнеков, конфигурация которых подбирается под тип перерабатываемого сырья; снизить время на получение готового продукта и улучшить его качество за счет достижения требуемой глубины физико-химических превращений вследствие термомеханической обработки; регулировать производительность экструдера и степень термомеханической деструкции экструдата с помощью конфигурации шнека и матрицы; обеспечить стабильную и надежную работу за счет упрощенной конструкции динамического формующего узла, легкость его обслуживания; расширить технологические возможности экструдера по производству закусочных продуктов различного поликомпонентного состава из сырья растительного и животного происхождения, обеспечить переработку побочных продуктов пищевых производств.

Основными результатами исследования являются:

- анализ экструзионной техники и технологии, в том числе используемых для производства экструдированных продуктов питания на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области, показавший необходимость разработки и внедрения на предприятия нового типа экструзионного оборудования с динамическим формирующим узлом, позволяющего перерабатывать широкий спектр сырья на одном аппарате без длительной и трудоемкой перенастройки экструдера;
- эмпирические зависимости влияния конструкционных параметров экструдера на технологические параметры процесса экструзии, отражающие физическую сущность процесса и позволяющие с достаточной точностью прогнозировать их изменение в исследованном диапазоне значений факторов;
- конструкция одношнекового экструдера для динамической экструзии пищевых продуктов, в частности закусочных продуктов, позволяющая расширить ассортимент и улучшить качество, выпускаемых снеков, расширить базу перерабатываемого на одном экструдере сырья, сократить количество производственного оборудования в технологической линии производства экструдатов, обеспечить стабильную и надежную работу, легкость в эксплуатации экструдера, экономически выгодно и экологически безопасно перерабатывать побочные продукты пивоваренных производств и побочные продукты переработки лососевых рыб, образуемые в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в большом количестве.

Полученные разработки могут быть использованы при проектировании или модернизации производственной и лабораторной экструзионной техники, или внедрении в производство нового оборудования на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области, которая бы по своему уровню не уступала зарубежным экструдерам, позволяла стабилизировать давление в предматричной зоне, вырабатывать широкий ассортимент экструдатов повышенного качества и обладала высокими степенями унификации.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния физико-химических свойств сырья на реологические свойства расплава биополимера и микроструктуру полученных экструдатов.

Литература

1. Rauwendaal, C. Effective troubleshooting of extrusion problems / C. Rauwendaal // AIP Conference Proceedings. 2016. №1779. P. 1–10.
2. Extrusion and Their Types in Manufacturing Process [Электронный ресурс]/ Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <https://www.indiastudychannel.com/resources/142400-Extrusion-and-Their-Types-in-Manufacturing-Process.aspx>, свободный.
3. Остриков А.Н. Коэкструзионные продукты: новые подходы и перспективы [Текст] / Остриков А.Н., Василенко В.Н., Соколов И.Ю. М.: ДЕЛИ Принт. 2009. 297 с.
4. Bordoloi R. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters / Bordoloi R., Ganguly S. // International Journal of New Technology and Research. 2014. №2 (1). P. 1–3.
5. Аксенова О.И. Корректирование расчетов оборудования для снижения его энергоемкости на базе моделирования технологического процесса экструдирования / Аксенова О.И., Алексеев Г.В. // Техника машиностроения. 2015. Т. 22. № 3. С. 27–37.



Василенок Анна Владимировна
Факультет Низкотемпературной энергетики
E-mail: vasilenok_anna@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ WBC УСТАНОВОК

А.В. Василенок

Научный руководитель – профессор А.Ю. Баранов

Аннотация

В статье представлен выбор оптимальных параметров для проведения WBC процедур. Получены практические рекомендации по уменьшению затрат электроэнергии и криоагента для проведения процедур WBC. Сформированы точное представление об истинной тепловой нагрузке на систему охлаждения зоны WBC, определена соответствующая тепловой нагрузке мощность электрического привода рефрижератора или затраты жидкого азота.

Ключевые слова

WBC (whole-body cryotherapy), тепловая нагрузка, жидкий азот, система охлаждения.

Цель проекта – выбор и обоснование оптимальных технологических параметров процесса WBC для одноместных и многоместных установок.

Задачи:

- определить величину мощности системы охлаждения для одноместных и многоместных установок для достижения криотерапевтического эффекта от процедуры WBC;
- описать работу азотной системы охлаждения в условиях полного технологического цикла WBC;
- обосновать величину номинальных затрат азота в одноместной криоустановке;
- выполнить численный эксперимент по оценке эффективности мероприятий перевода действующих аппаратов с «безазотной» системой охлаждения (NFCS) и рабочей температурой 160 К на криостатирование с помощью азотной системы охлаждения (NCS), работающий на температурном уровне 130-140 К;

Криотерапия – метод лечения, основанный на охлаждении поверхности кожного покрова человека до температуры -2°C [1]. Широкий список медицинских показаний к применению криотерапии всего тела (WBC – whole-body cryotherapy) определяет потребность общества в специальной технике. Производство криотерапевтических установок долгое время развивалось спонтанно, без достаточного теоретического обоснования, поэтому системы охлаждения в данных установках разнообразны и не поддерживают уровень мощности, который мог бы обеспечить лечебный эффект. Сложившиеся технологические решения крайне противоречивы и не поддаются систематизации. Развитие производства криотерапевтических систем в России нуждается в четких и обоснованных технологических рекомендациях.

Методика WBC была разработана и внедрена в клиническую практику примерно 40 лет назад в Японии, где процедура, основанная на тотальном контакте кожного

покрова тела с криогенным газом была использована для лечения ревматоидного артрита. Автор метода Т. Ямаучи использовал для организации процедуры установку из низкотемпературных камеры и входного шлюза, в которых температура воздуха поддерживалась на уровне -170 и -60 °С. Последние исследования на математической модели криотерапевтической системы показали, что температура в основной кабине комплекса поддерживалась на уровне -170 °С без использования системы управления подачей жидкого азота. Температурный режим в объеме камеры определяло требование о недопустимости конденсации воздуха на поверхности теплообменника. Температура наружной поверхности теплообменника T_{HC} должна быть выше температуры конденсации воздуха T_A'' :

$$T_{HC} > T_A'' = 81 \text{ K.} \quad (1)$$

Отвод теплоты от воздуха к поверхности теплообменника осуществлялся за счет естественной конвекции. При естественной конвекции расчетный градиент температур между газом и теплоотводящей поверхностью составляет 20 К:

$$\Delta T_{A-HC} = T_A - T_{HC} \approx 20 \text{ K.}$$

Минимально возможная температура воздуха в кабине:

$$T_A = T_A'' + \Delta T_{A-HC} \approx 101 \text{ K.}$$

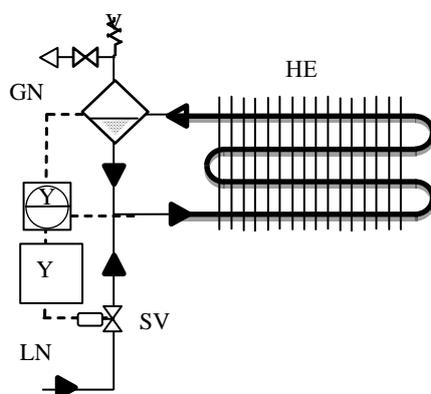


Рис. 1. Принципиальная схема системы охлаждения японской криотерапевтической установки

Таким образом, указанное автором метода значение температуры воздуха во время сеансов WBC, является минимально температурой, которую можно обеспечить в кабине данной конструкции. Важно отметить, что в «Cryotium» температура поддерживалась за счет выбора давления паров жидкого азота (LN) в трубах теплообменника. Температура кипения LN зависит от давления паров азота в трубах теплообменника HE (рис. 1). Повысив давление до уровня $P \geq 0,2$ МПа, можно обеспечить выполнение условия (1) без использования систем контролирующей температуру. Отсутствие системы контроля температуры обеспечило «Cryotium» уникальные эксплуатационные преимущества над современными аппаратами для WBC. Теплообменники, заполненные жидким азотом успешно справлялись с увеличением

тепловой нагрузки при входе пациентов, а правильный выбор рабочего давления предупредил конденсацию воздуха.

Контроллер уровня жидкости YC (рис. 1) в теплообменнике HE управляет работой соленоидного клапана SV по сигналам датчика уровня Y. При уменьшении уровня клапан SV открывает подачу жидкого азота LN в теплообменник. Криогенная жидкость поступает в трубы теплообменника HE, где частично испаряется за счет подвода теплоты от воздуха процедурной. Парообразование уменьшает плотность потока в трубах, парожидкостная смесь выталкивается из верхней части теплообменника в отделитель жидкости LS. В этом аппарате жидкость и пар разделяются. Жидкость стекает в нижнюю секцию теплообменника HE и снова участвует в отводе теплоты.

Пары LN накапливаются в верхней части отделителя жидкости LS. Давление паров регулирует предохранительный клапан V, который открывается при давлении 0,22 МПа. Давление паров определяет температуру кипения LN и температуру труб теплообменника HE, которая должна соответствовать условию (1). Температура воздуха в основной кабине «Cryotium» в присутствии пациентов повышается до -170°C . В паузах между процедурами, когда тепловая нагрузка на систему охлаждения снижается в 10 раз. Температура воздуха в основной кабине приближается к температуре труб теплообменника:

$$\Delta T_{A-HC} \rightarrow 5 \text{ K}, \quad T_A \rightarrow T_A'' + \Delta T_{A-HC} \approx 86 \text{ K}.$$

Температура воздуха в кабине все время остается на минимально возможном уровне.

Следует подчеркнуть, что такая система криостатирования предназначена для поддержания минимально-возможной температуры в камере заполненной воздухом. Т.е. заказчик установки «Cryotium», Т. Ямаучи, поставил перед разработчиками задачу обеспечить именно минимальную температуру, которая по результатам физических измерений оказалась равной -170°C .

На сегодняшний день практика эксплуатации аппаратов для WBC показывает, что главной проблемой действующих устройств для проведения процедур является недостаточная мощность системы охлаждения. Это утверждение справедливо для установок с азотной системой охлаждения, в которых номинальные затраты жидкого азота не обеспечивают стабилизацию температуры в зоне WBC [2]. Еще больше дефицит мощности наблюдается у «безазотных» систем охлаждения, которые используют для отвода теплоты паровые холодильные циклы. Мощность электрического привода этих рефрижераторов в 5-10 раз меньше, чем нужно для отвода тепловой нагрузки на заявленном уровне температуры воздуха в зоне WBC. Низкая мощность систем охлаждения не позволяет современным многоместным установка для WBC поддерживать температуру на уровне -170°C , как в оригинальной японской установке, в которой впервые был получен криотерапевтический эффект. Причиной недостаточной мощности систем охлаждения установок для WBC является ошибочная оценка мощности выделения теплоты с поверхности тела пациентов, ошибочные конструктивные решения при проектировании кабин для проведения процедур, неверный выбор технологии отвода теплоты от охлаждающего газа к криоагенту.

Недостаточная энерговооруженность систем охлаждения является основной причиной низкой лечебной эффективности большинства современных устройств для проведения процедур WBC. Температура в зоне WBC нестабильна. В присутствии пациентов происходит повышение температуры на 30-50 К. Установки криостатируемые посредством паровых холодильных циклов после каждой процедуры восстанавливают температуру в основной кабине в течение 8-10 минут.

Теплота, отводимая с поверхности тела пациента, представляет собой полезную нагрузку на систему криостатирования (CS). Наряду с полезной нагрузкой всегда существуют источники теплоты, которые не связаны с получением лечебного эффекта. Полная тепловая нагрузка на CS представляет собой сумму полезной Q_{s-1} и бесполезной Q_{us} нагрузки:

$$Q_{ful} = Q_{s-1} + Q_{us}.$$

Бесполезная тепловая нагрузка складывается из теплоты, проникающей сквозь теплоизоляцию Q_{iz} , и теплоты, которую переносят потоки газа поступающего в зону WBC Q_{konw} . Наибольшее количество более теплого газа проникает в зону WBC через двери. Двери кабины открываются дважды за процедуру при входе и выходе пациентов. В одноместных криосаунах через открытые двери проникает атмосферный воздух, который в начале каждой процедуры надо заменить парами азота. Количество теплоты, которое за одну процедуру атмосферный воздух вносит в 1 м³ объема одноместной кабины составляет:

$$Q_{konw} = \rho_1 \cdot c_{konw}(T_{konw} - T_1),$$

где ρ_1 – плотность охлаждающего газа при номинальной температуре зоны WBC, кг/м³; T_1 – номинальная температура зоны WBC, К; c_{konw} – теплоемкость газа поступающего в зону WBC, Дж/(кг К); T_{konw} – температура газа поступающего в зону WBC, К.

Аналогично рассчитывается конвективный подвод теплоты в кабину и шлюз многоместной установки для WBC. Атмосферный воздух полностью заполняет шлюзовую кабину при входе и выходе пациентов. Относительно теплый воздух из шлюзовой камеры (lock-chamber (LC)) ($t_{LC} = -60$ °С) проникает в основную кабину (main chamber (MC)), где смешивается с более холодным воздухом ($-130 \leq t_{MC} \leq -110$ °С) в соотношении 1/1. В результате смешения температура воздуха в LC и MC выравнивается до уровня средней температуры:

$$\bar{t} = 0,5(T_{MC} + T_{LC}), \quad -95 \leq \bar{t} \leq -85 \text{ °С}.$$

Из-за повышения температуры плотность воздуха в основной кабине снижается на 0,5 кг/м³. После закрытия переходного люка температура воздуха в MC постепенно снижается до номинального уровня, плотность воздуха повышается. Для сохранения давления на нормальном уровне необходимо подвести в объем дополнительно 0,5 кг/м³ воздуха. Это воздух поступает в MC из LC и вносит дополнительное количество теплоты. Одно открытие переходного люка между MC и LC приводит к тому, что в объем MC дополнительно поступает 116 кДж/м³ теплоты с потоком газа из LC. За одну процедуру двери между LC и MC открываются дважды, соответственно конвективный подвод теплоты в MC за одну процедуру составляет 232 кДж/м³. Заполнение LC за одну процедуру повторяется дважды, при этом в объем LC поступает 256 кДж/м³. Удельный подвод теплоты конвекцией в одноместной кабине составляет 365 кДж/м³.

Теплота поступает от тепловой изоляции LC и MC. Влияние притока теплоты через изоляцию в многоместном и одноместном устройстве существенно различается. Многоместная кабина проходит этап предварительного охлаждения продолжительностью 2-3 часа. На этом этапе происходит охлаждение теплоизоляционной конструкции. Во время процедур от изоляции подводится только теплота перенесенная теплопроводностью изоляции (47 кДж/м³).

В одноместном устройстве нет режима охлаждения изоляции. После каждой процедуры одноместная кабина заполняется атмосферным воздухом, поэтому в начале процедуры температура внутренней поверхности изоляции равна температуре окружающей среды. Во время процедуры внутренняя поверхность изоляции охлаждается до температуры близкой к номинальной температуре зоны WBC [3]. При этом выделяется много аккумулированной изоляцией теплоты. Негативное влияние изоляции усиливается тем, что объем одноместной кабины менее $0,5 \text{ м}^3$. В кабине малого объема удельная поверхность теплового ограждения составляет $6,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Для сравнения удельная поверхность изоляции многоместных кабин составляет всего $2,4 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Из-за сочетания всех перечисленных факторов удельный подвод теплоты от стенок одноместной кабины в 10 раз больше, чем в многоместном устройстве (таблица).

В таблице приведены значения удельного подвода теплоты от поверхности тела пациента. В одноместной кабине подвод удельный теплоты от тела пациента в 5 раз выше [4]. Это связано с высокой компактностью размещения пациента в кабине. На одного пациента приходится $0,5 \text{ м}^3$ объема одноместной кабины. В многоместных устройствах на одного пациента приходится до 2 м^3 объема LC и MC. Удельный подвод теплоты от поверхности тела пациента в одноместных устройствах 5,2 раза выше, чем в многоместных.

Таблица

Теплота поступающая за одну процедуру в зону WBC многоместного и одноместного устройства (кДж/м³)

Источники поступающей теплоты	Одноместное	Многоместное
Конвективный подвод теплоты	364	488
Теплота от поверхности тела пациента	1460	279
Теплота от теплового ограждения зоны WBC	493	47
Всего теплоты	2317	814

Обработка материалов таблицы позволяет оценить энергетическую эффективность многоместных и одноместных устройств. Для этого можно рассчитать тепловой коэффициент полезного действия (thermal coefficient of efficiency (TCE) для одноместного и многоместного устройства:

$$\eta_H = \frac{Q_{s-1}}{Q_{ful}}$$

TCE одноместного устройства составил 0,63, а многоместного 0,34. Вопреки распространенному мнению одноместные устройства почти в два раза экономичнее многоместных систем.

Затраты энергии на отвод тепловой нагрузки из зоны WBC. Мощность теплового потока, который надо отвести из зоны WBC определится по формуле:

$$q_{ful} = \frac{N \cdot F_s \cdot Q_{s-1}}{\tau \cdot \eta_H},$$

где N – число пациентов в кабине; F_s – средняя площадь поверхности тела пациента, m^2 ; τ – продолжительность процедуры, с.

Для простоты изложения примем $N=1$, $F_s=1,6 m^2$, $\tau=180$ с. Тогда с учетом значения ТСЕ получим, что мощность теплового потока в многоместном устройстве составит 11,8 кВт, а в одноместном 6,4 кВт.

Эту тепловую нагрузку надо отвести с температурного уровня -130 °С. С понижением температуры затраты энергии на отвод тепловой нагрузки возрастают. Отношение отведенной мощности к затратам электроэнергии охлаждающей системе называют холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = \frac{q_{ful}}{n_e}$$

На температурном уровне -130 °С $\varepsilon = 0,25$, т.е. мощность системы охлаждения должна быть в 4 раза больше мощности тепловой нагрузки. В одноместном устройстве необходима система охлаждения с мощностью 26 кВт, а при многоместном исполнении мощность электропривода в расчете на одного пациента составляет 47 кВт. Для устройства на пять пациентов необходим рефрижератор потребляющий 235 кВт [5-6].

Полученные результаты объясняют причины популярности систем с азотным охлаждением. На температурном уровне -130 °С теплоотводящая способность жидкого азота (LN) составляет $q_{LN} = 260$ кДж/кг. Расход жидкого азота в NCS определяется из выражения:

$$g_{LN} = \frac{q_{ful}}{q_{LN}}$$

Для одноместной кабины расход азота в NCS составит 0,025 кг/с или 4,45 кг на процедуру. В пятиместной кабине расчетный расход LN 0,025 кг/с или 41 кг на процедуру. Такие затраты LN вполне можно обеспечить на практике, в то время как рефрижераторы с потребляемой электрической мощностью 47 и 235 кВт требуют дополнительных затрат на подключение.

Выполненный анализ затрат электроэнергии и криоагента на проведение процедур WBC показал, что для эффективной работы WBC необходимо обеспечить соответствие энерговооруженности CS технологической тепловой нагрузке. Расчетная мощность электропривода NFCS одноместных криосаун составляет 26 кВт, для многоместных систем нужно обеспечить 47 кВт мощности электропривода NFCS на каждого пациента. С учетом полученных значений изготовление эффективных устройств для WBC с использованием NFCS нерентабельны. Одноместные криосауны с NCS должны расходовать на одного пациента не менее 4,5 кг жидкого азота. В многоместных системах расход азота на одного пациента не менее 8,1 кг. Недостаточная подача криоагента снижает лечебную эффективность процедур WBC, поэтому попытки экономить жидкий азот недопустимы. Эффективность использования аппаратуры для WBC определяется соблюдением изложенных выше технологических и методических условий. Нельзя относить к криотерапевтическим аппараты, которые по своим технологическим параметрам не могут обеспечивать эффективную криостимуляцию.

Литература

1. Баранов А.Ю., Шестакова О.А., Василёнок А.В. Двадцать лет клинической эксплуатации отечественных аппаратов для общего криотерапевтического воздействия // Холодильная техника. 2018. №5. С. 2-7.

2. Baranov A.Y., Filatova O.A., Vasilenok A.V., Safonov A.V., Sokolova E.V. Energy requirements for nitrogen cooling systems of WBC units // Вестник Международной академии холода. 2019. № 1(70). С. 92-97.
3. Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Шестакова О.А. Теплофизические основы производства эффективной аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. № 3(45). С. 39-57.
4. Баранов А.Ю. Низкотемпературные установки медицинского назначения. Ч. 1. Аппараты для общего криотерапевтического воздействия: учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО; ИХиБТ. 2016. 178 с.
5. Баранов А.Ю., Шестакова О.А., Василёнок А.В. Двадцать лет клинической эксплуатации отечественных аппаратов для общего криотерапевтического воздействия // Холодильная техника. 2018. №5. С. 2-7.
6. Чернышев И.С. Современные аспекты криомедицины // Медицинская криология: Международный сб. трудов. Н. Новгород. 2002. С. 57–69.



Жигновская Диана Валерьевна
Факультет Низкотемпературной энергетики
E-mail: diana.zhigovskaya@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВИНТОВОГО ОДНОРОТОРНОГО КОМПРЕССОРА

Д.В. Жигновская

Научный руководитель – профессор, д.т.н. В.А. Пронин

Аннотация

В современном мире компрессорное оборудование является незаменимой частью множества производств. Россия в список производителей ВКО не входит, что ставит промышленность Российской Федерации в зависимость от внешнеэкономических факторов и делает задачу данного проекта актуальной в плане импортозамещения. Производители винтовых компрессоров уделяют большое внимание разработкам новых профилей рабочих органов компрессоров, однако достоверные данные по испытаниям ВКО с современным эффективным профилем зуба отсутствуют, а публикации в литературных источниках носят рекламный характер. Изучаемая в проекте тематика параметров рабочих органов ВКО с окружным профилем зуба отсекаателя в мировой науке не исследована, так как данная модель ВКО является запатентованной отечественной разработкой, не имеющей мировых аналогов.

Ключевые слова

холодильная техника, газодинамика, винтовой однороторный компрессор, зуб отсекаателя окружного профиля, 3D-моделирование, композиционные материалы.

Целью исследования является повышение эффективности и надежности работы винтовых компрессоров, решение оптимизационной задачи по выбору параметров рабочих органов ВКО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Выполнить литературный обзор научно-технической литературы.
2. Разработка математической модели ВКО и методики расчета основных рабочих характеристик ВКО.
3. Разработать алгоритм автоматизированной системы моделирования, реализующей информационную технологию выполнения функций проектирования с использованием программных комплексов, средств автоматизации и аддитивных технологий для профилирования рабочих органов винтового однороторного компрессора.
4. Создание макета рабочих органов винтового однороторного компрессора с применением периферийных устройств, использующих метод послышной подачи материала для создания физического объекта по цифровой 3D модели.
5. Упростить технологию изготовления рабочих органов винтового однороторного компрессора и удешевить производство с помощью применения новых неметаллических материалов, обладающих антифрикционными свойствами.

6. Проектирование и изготовление опытного образца ВКО с окружным профилем зуба отсекаателя.

7. Проведение экспериментальных исследований опытного образца ВКО на испытательном стенде.

8. Анализ полученных результатов исследований опытного образца ВКО.

9. Подача патентных заявок на разработанную конструкцию ВКО и его рабочих органов; Выдача рекомендаций для серийного производства ВКО с окружным профилем зуба отсекаателя.

Объектом исследования по данному проекту является технология проектирования и изготовления ВКО с окружным профилем зуба отсекаателя, применяемых в пищевой, холодильной, нефте- и газоперерабатывающей промышленности [1].

Недостатками всех винтовых машин можно является наличие нескольких видов потерь. Протечки компримируемой среды из областей повышенного давления в области пониженного давления являются самым важным видом потерь в винтовом однороторном компрессоре. Протечки подразделяются на утечки и перетечки в зависимости от их характера протечек. Утечками условно это протечки на всасывание, а перетечки – это протечки между полостями, который находятся под различным давлением, но не таким же как давление всасывания. Величина протечек рабочей среды зависит от полной площади щелей. Большое влияние оказывает глубина щели, которую можно регулировать за счёт изменения толщины зуба отсекаателя [5-10].

Анализируя потери можно сказать, что для машин с почти одинаковыми геометрическими и рабочими параметрами - величины одного порядка, хотя в однороторных компрессорах потери на трение меньше, потому что винт ВКО разгружен от действия радиальных сил.

Всё выше, перечисленное позволяет сделать вывод, что основные процессы в рабочей части винтового однороторного компрессора характеризуются рядом особенностей:

- при переменных термодинамических параметрах происходят рабочие процессы в компрессоре;
- при переменной массе компримируемой среды будут происходить все процессы;
- рабочей части ВКО протечки компримируемой среды через щели оказывают влияние на параметры вещества;
- рабочие процессы в ВКО периодически повторяются и делятся тысячные доли секунды;
- параметры компримируемой среды могут различаться в значениях в пределах одной полости в зависимости от значительных окружных скоростях рабочих органов ВКО, а подвижность их стенок оказывает влияние на характер течения рабочего вещества через щели.

Производство и эксплуатация винтовых компрессоров являются основными проблемами. Анализ двух этих проблем показывает, что одним из важных факторов являются протечки в зазорах рабочей части машины, они определяются сечениям и являются объёмными потерями. Между высотой глубиной данной щели есть зависимость относительно типа щели [2].

Рабочая полость винтового компрессора ограничена рабочими органами (винтами, отсекаателями) и корпусом, поэтому эффективность работы компрессора будет определяться протечками компримируемой среды через щели между элементами, образующими замкнутую полость. Глубину щелей и их сопротивление можно

регулировать с помощью изменения толщина зуба отсекаателя, что будет оказывать влияние на теоретическую производительность машины, которая же зависит от объёма рабочей полости центрального винта (рис. 1).

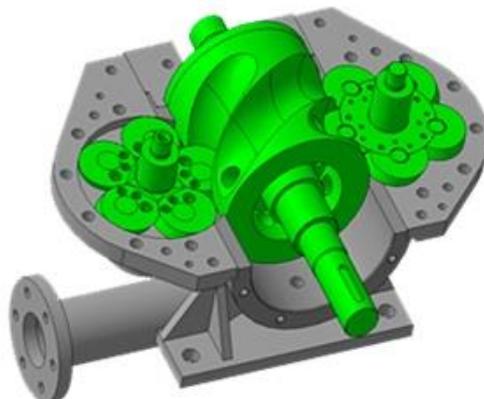


Рис. 1. 3Д модель винтового однороторного компрессора

Проблемы, связанные с формой ротора и отсекаателей, могут быть решены созданием универсальных алгоритмов и пошаговых методик для полного изучения оптимизаций и зацеплений винтов с любым профилем зубьев отсекаателя и с главной целью поиска более оптимальных их отработки технологических процессов производства.

Но при увеличении объёма впадин центрального винта увеличивается суммарное сечение щелей, через которые происходит перетекание компримируемой среды из полостей с большим давлением, что приводит к уменьшению теоретической объёмной производительности.

Нами рассмотрена проблема оптимизации толщины зуба из условия жесткости при различных перепадах давлений.

В данной работе произведены расчёты толщины зуба из условий жесткости с учётом минимизации протечек компримируемой рабочей среды между зубьями отсекаателей и канавками центрального винта через щели в рабочей части компрессора [3].

Основные критерии работоспособности зубьев:

- изгибная выносливость (усталостный излом зубьев);
- изгибная прочность (величина кратковременной перегрузки без появления).

При недостаточной изгибной выносливости выход следует искать в двух направлениях:

- выбор материала с более высокими механическими свойствами;
- подбор геометрических параметров зуба отсекаателя.

На графиках ниже представлена зависимость полной деформации от толщины рабочего органа винтового однороторного компрессора (зуба) в зависимости от выбранного материала. Испытания были смоделированы в Camsolve, при условии давления нагнетания 0,8 Мпа (рабочее давление) и давлении всасывания 0,1 Мпа.

Энергетические показатели ВКО зависят от величины зазоров в рабочей части компрессора, они определяются такими факторами:

- степень повышения давления;
- рабочая среда;

- температурный режим;
- схема конструктивного исполнения.

Зазоры должны обеспечивать безопасность работы компрессора, их величину выбирают с учетом силовых деформаций и температурных различий деталей, и узлов компрессора. Для получения эффективных характеристик машины необходимо учитывать зазоры при проектировании, которые могут оказывать наибольшее влияние. Потери в ВКО обычно делят на внутренние и внешние (рис. 2).

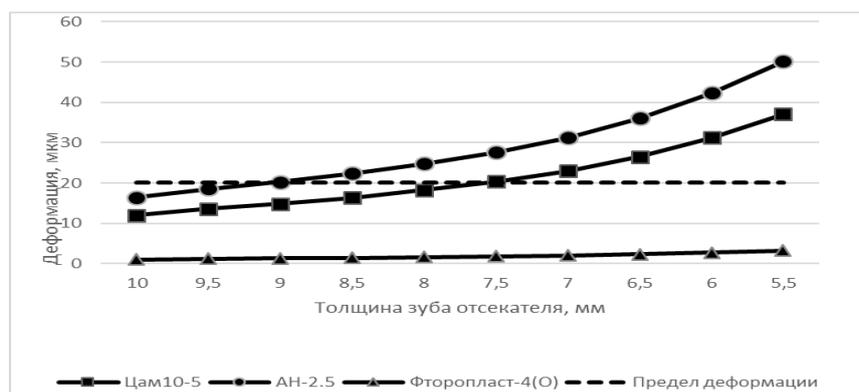


Рис. 2. Зависимость деформаций зуба отсекателя от его толщины

Также были проанализированы недостатки и преимущества композиционных материалов и были выбраны следующие: ZEDEX-100K, ФТОРОПЛАСТ-4, U3 NYLON SUPER CARBON, KERITAL TX-31, POM-C. Все эти материалы пригодны для 3Д печати и изготовления подшипников, зубчатых колес, поршневых колёс, следовательно могут быть применимы и для рабочих органов ВКО. Обладают низким коэффициентом трения и линейного расширения, повышенной износостойкостью, стойки к нагреву, имеют высокую твёрдость.

Но наиболее лучшие результаты в сравнении с исходным материалом Бронзой, где прогиб не так сильно увеличивается при перепадах давления, у материалов KERITAL TX-31, POM-C, ZEDEX-100K (рис. 3).

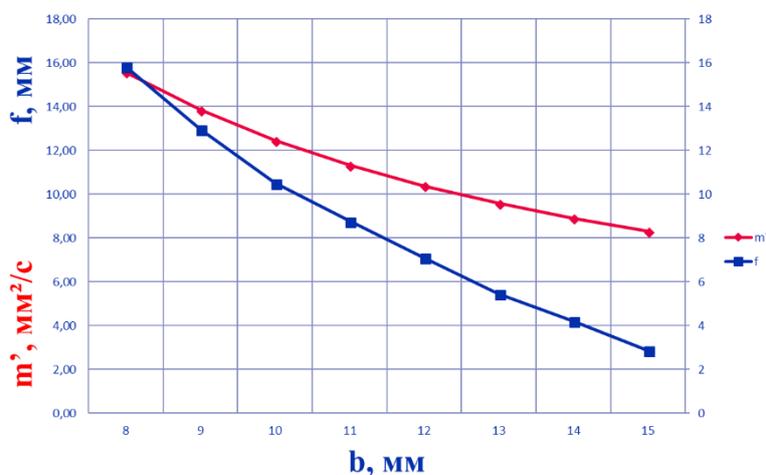


Рис. 3. Зависимости расхода протечек рабочей среды m' и максимального прогиба зуба f отсекателя от его толщины b

В нашем случае коэффициент линейного расширения имеет важную роль при проектировании машины и назначении зазоров, так как существует ряд механических и тепловых деформаций. Исходный радиус зуба отсекателя 30 мм. По полученным зависимостям показана полная длина детали с учётом теплового расширения для каждого материала (рис. 4). Где видно, что минимальные изменения полной длины будут у материалов POM-C, ZEDEX-100K, NYLON SUPER CARBON [4].

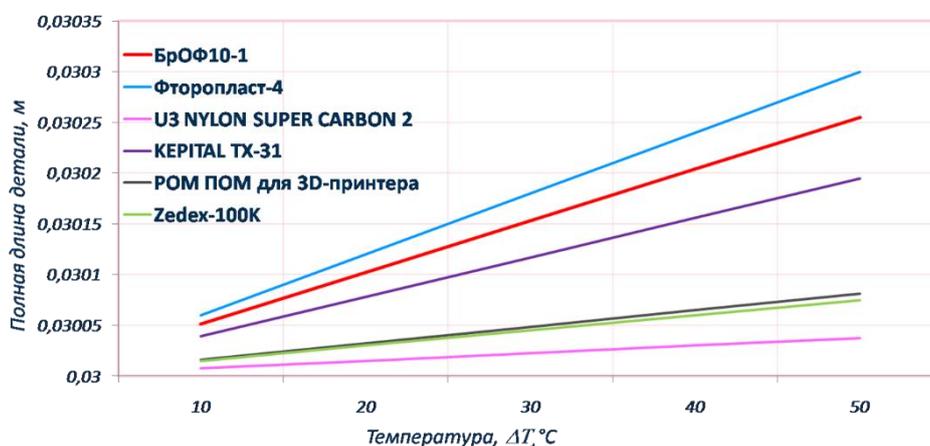


Рис. 4. Зависимость полной длины детали от температуры

Выбор материала для поставленных целей осуществляется исходя из следующих параметров:

- Максимального прогиба;
- Коэффициента теплового расширения;
- Коэффициента трения;
- Твёрдости;
- Цены.

Наиболее подходящим будет материал ZEDEX-100K, так как имеет низкую стоимость изготовления деталей, идентичную твёрдость с исходным материалом, более низкий коэффициент трения и теплового расширения, что наглядно показано на диаграммах.

Литература

1. Миникаев А., Пронин В.А., Жигновская Д.В., Кузнецов Ю.Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода. 2018. № 1(66). С. 61-66.
2. Pronin V.A., Kuznetsov Y.L., Zhignovskaia D.V. Features of designing screw compressors for the oil and gas industry // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007, pp. 030017.
3. Пронин В.А., Кузнецов Ю.Л., Жигновская Д.В., Миникаев А., Ережеп Д. Совершенствование методики расчёта протечек компримируемой среды в рабочей части винтового компрессора // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 9-й международной научно-технической конференции [сборник тезисов]. 2019. С. 98-99.
4. Pronin V.A., Kuznetsov Y.L., Zhignovskaia D.V., Minikaev A.F., Yerezhep D. Improving methodology calculating the leakages compressible environment in the

- working part of a screw compressor // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141, pp. 030010.
5. Пронин В.А., Жигновская Д.В., Божедомов А.В., Семенов А.А., Минакаев А. Технология изготовления винтового однороторного компрессора на базе 3D-моделирования // Холодильная техника. 2019. № 10. С. 2-7.
 7. Пронин В.А., Жигновская Д.В. Исследование антифрикционных композиционных материалов для рабочих органов винтовых//Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб: Университет ИТМО. 2019.
 8. Пронин В.А., Минакаев А.Ф., Жигновская Д.В., Кузнецов Ю.Л. Использование методов компьютерного моделирования для разработки профилей рабочих органов винтового однороторного компрессора // Вестник Международной академии холода.2018. № 1(66). С. 61-66.
 9. Пронин В.А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики [Текст]: дис. докт. тех. наук. / Пронин В.А. СПб.,1998, 226 с.
 10. Сакун И.А. Винтовые компрессоры: Основы теории, методы расчета, конструкции. Л.: Машиностроение.1970. 400 с.



Квицинский Анатолий Геннадьевич
Факультет Фотоники и оптоинформатики
E-mail: anatolykvitsinskiy@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

А.Г. Квицинский

Научный руководитель – к.ф.-м.н. М.К. Ходзицкий

Аннотация

Научный проект посвящён экспериментальному исследованию поляризационных состояний углеродных наноматериалов в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Для исследования малослойного графена (few-layer graphene, FLG) на кремниевой (Si) подложке и тонкой плёнки случайно ориентированных одностенных углеродных нанотрубок (single-walled carbon nanotube, SWCNT) на Si-подложке при внешней оптической накачке и во внешнем статическом магнитном поле в ТГц диапазоне частот применён метод импульсной ТГц поляриметрии с разрешением во времени (terahertz time-domain polarimetry, THz-TDP). Для образцов были экспериментально получены зависимости азимутального угла и угла эллиптичности эллипса поляризации от частоты в диапазоне 0,1–1,0 ТГц и эллипс поляризации на частоте 0,5 ТГц. Результаты научного проекта подтверждают факт, что на основе углеродных наноматериалов возможна разработка эффективных перестраиваемых ТГц поляризаторов для применения в новейших системах связи и безопасности.

Ключевые слова

Импульсная терагерцовая поляриметрия, малослойный графен, одностенные углеродные нанотрубки, поляризационные состояния, параметры Стокса, эффект Фарадея.

Введение

Фундаментальные исследования в области оптики и их прикладное применение для разработки устройств и материалов терагерцовой (ТГц) фотоники являются актуальными задачами. В настоящее время одной из проблем для развития ТГц фотоники является отсутствие доступных и эффективных перестраиваемых под внешними воздействиями устройств для модуляции поляризации электромагнитного излучения ТГц диапазона частот [1]. Одним из методов решения данной проблемы является исследование углеродных наноматериалов [2-3] для применения в качестве функциональной среды в ТГц поляризаторах благодаря уникальным оптическим и электронным свойствам таких материалов. Эффективным методом исследования углеродных наноматериалов является метод импульсной ТГц поляриметрии с разрешением во времени (terahertz time-domain polarimetry, THz-TDP), который даёт возможность получить необходимые поляризационные параметры.

Целью данного проекта являлось экспериментальное исследование поляризационных состояний углеродных наноматериалов в ТГц диапазоне частот с

помощью метода THz-TDP для разработки устройств модуляции поляризации электромагнитного излучения ТГц диапазона частот.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *задачи*:

- 1) разработать оптико-электронный комплекс для экспериментального исследования графена и углеродных нанотрубок с помощью метода THz-TDP при внешней оптической накачке (ОН) и во внешнем статическом магнитном поле (МП);
- 2) на основе экспериментально полученных временных форм ТГц сигналов рассчитать зависимости азимутального угла и угла эллиптичности эллипса поляризации для образцов.

Научная новизна данного проекта состоит в экспериментально полученных поляризационных состояниях малослойного графена и случайно ориентированных одностенных углеродных нанотрубок в ТГц диапазоне частот.

Методология и методы исследования

В качестве экспериментальных образцов были выбраны малослойный графен (few-layer graphene, FLG) на кремниевой (Si) подложке, тонкая плёнка случайно ориентированных одностенных углеродных нанотрубок (single-walled carbon nanotube, SWCNT) на Si-подложке, образец Si-подложки. FLG был синтезирован в Университете Эксетера (University of Exeter), Великобритания, с помощью метода химического осаждения из газовой фазы в кварцевой печи на никелевой подложке [4] и затем перенесён на Si-подложку. SWCNT были синтезированы в Королевском технологическом институте (KTH Royal Institute of Technology), Швеция, с помощью метода химического осаждения из паров этанола на микропористом нитроцеллюлозном фильтре [5] и затем перенесены на Si-подложку. Образец монокристаллической Si-подложки с высоким удельным сопротивлением был произведён в Тидекс (Tydex), Россия.

Для исследования морфологии поверхности образцов были получены изображения растровой электронной микроскопии (scanning electron microscopy, SEM) (рис. 1). На основании SEM-изображений видно, что графен распределён по поверхности Si-подложки в виде неупорядоченных хлопьев с различным числом слоёв, а углеродные нанотрубки распределены по поверхности Si-подложки в виде неупорядоченной сетки с различной плотностью.

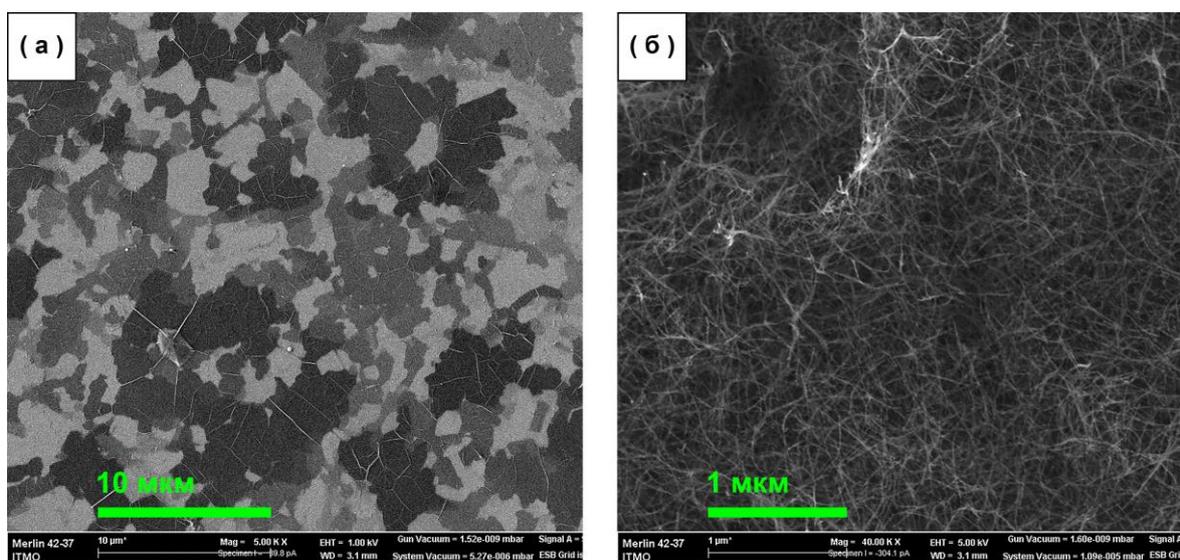


Рис. 1. SEM-изображения (вид сверху) (а) FLG на Si-подложке и (б) SWCNT на Si-подложке

Количество слоёв графена было определено с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света и было равно $\sim 3-7$ слоёв. Диаметры нанотрубок были рассчитаны по графику зависимости энергий разрешённых оптических переходов от диаметра нанотрубок и были равны $\sim 1,3-2,0$ нм. Длина нанотрубок была получена с помощью просвечивающей электронной микроскопии и была равна ~ 15 мкм. Толщина плёнки нанотрубок рассчитывалась по оптическому поглощению на длине волны 550 нм и была равна ~ 110 нм. Толщина Si-подложки была равна ~ 1 мм.

Для экспериментального исследования поляризационных состояний образцов с помощью метода THz-TDR был разработан комплекс (рис. 2), основными компонентами которого являлись ТГц спектрометр [6], система из двух поляризаторов, инфракрасный (ИК) лазер с длиной волны излучения 980 нм для создания внешней ОН $\sim 1,0$ Вт/см² и магнит неодим-железо-бор с аксиальным намагничиванием для создания внешнего статического МП $\sim 1,3$ Т. Временные формы ТГц сигналов, прошедших через экспериментальные образцы при различных внешних воздействиях, записывались с помощью программного обеспечения (ПО) LabVIEW (National Instruments, Corp., США) при параллельном и при скрещённом под углом 45° направлениях пропускания поляризаторов. Все измерения проводились в Международной научной лаборатории «Терагерцовая биомедицина» Университета ИТМО, Россия, при постоянной температуре воздуха ~ 291 К и относительной влажности воздуха $\sim 40\%$.

При обработке данных было использовано ПО MATLAB R2018b (The MathWorks, Inc., США) и OriginPro 2018 (OriginLab Corp., США). Для достижения максимального отношения сигнал/шум применялся метод шумоподавления на основе Coiflet-вейвлета 4-го порядка и прямоугольной оконной функции для исключения влияния поглощения водяного пара.

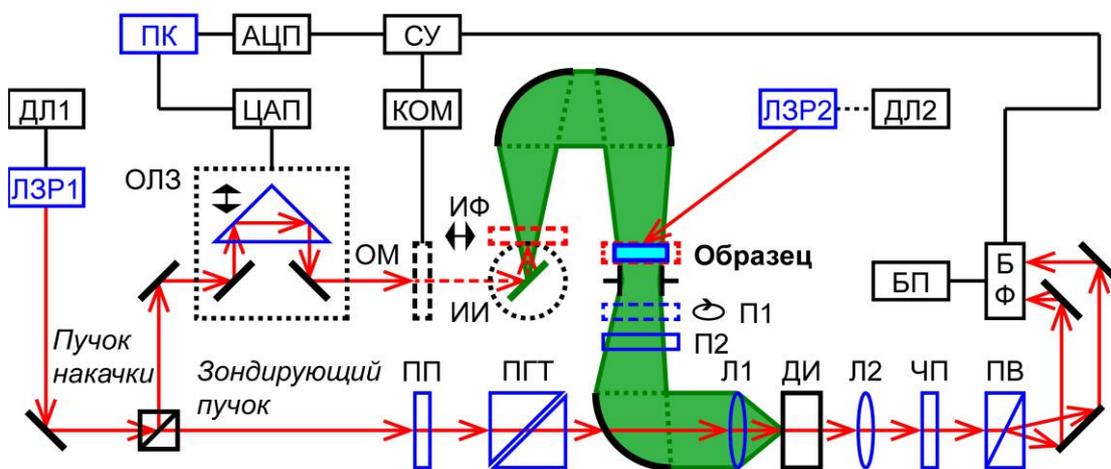


Рис. 2. Схема структурная экспериментальной установки

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БП – блок питания балансного фотодетектора; БФ – балансный фотодетектор; ДИ – детектор ТГц излучения на основе кристалла теллурида кадмия; ДЛ1, ДЛ2 – драйверы лазерных диодов; ИИ – источник ТГц излучения на основе кристалла арсенида индия; ИФ – ИК отсекающий фильтр из политетрафторэтилена; КОМ – контроллер оптического модулятора; Л1, Л2 – собирающие линзы; ЛЗР1 – фемтосекундный Yb:KYW лазер с длиной волны 1040 нм; ЛЗР2 – лазер с длиной волны 980 нм; ОЛЗ – оптическая линия задержки; ОМ – оптический модулятор; П1 – вращающийся поляризатор; П2 – статичный поляризатор; ПВ – призма Волластона; ПГТ – призма Глана-Тейлора; ПК – персональный компьютер; ПП – полуволновая пластинка; СУ – синхронный усилитель; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ЧП – четвертьволновая пластинка

Результаты и обсуждение

Экспериментальные частотные зависимости азимутального угла ψ и угла эллиптичности χ эллипса поляризации электромагнитных волн, прошедших через образцы (рис. 3, 4), и были рассчитаны в соответствии с параметрами Стокса по формулам (1–2):

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^2 + E_2^2 \\ E_1^2 - E_2^2 \\ 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \delta \\ 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot \tan^{-1}(S_2 \cdot S_1^{-1}) \\ 0.5 \cdot \sin^{-1}(S_3 \cdot S_0^{-1}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где E_1 и E_2 – амплитуды параллельных и перпендикулярных компонент вектора электрического поля E ; δ – разность фаз между ними.

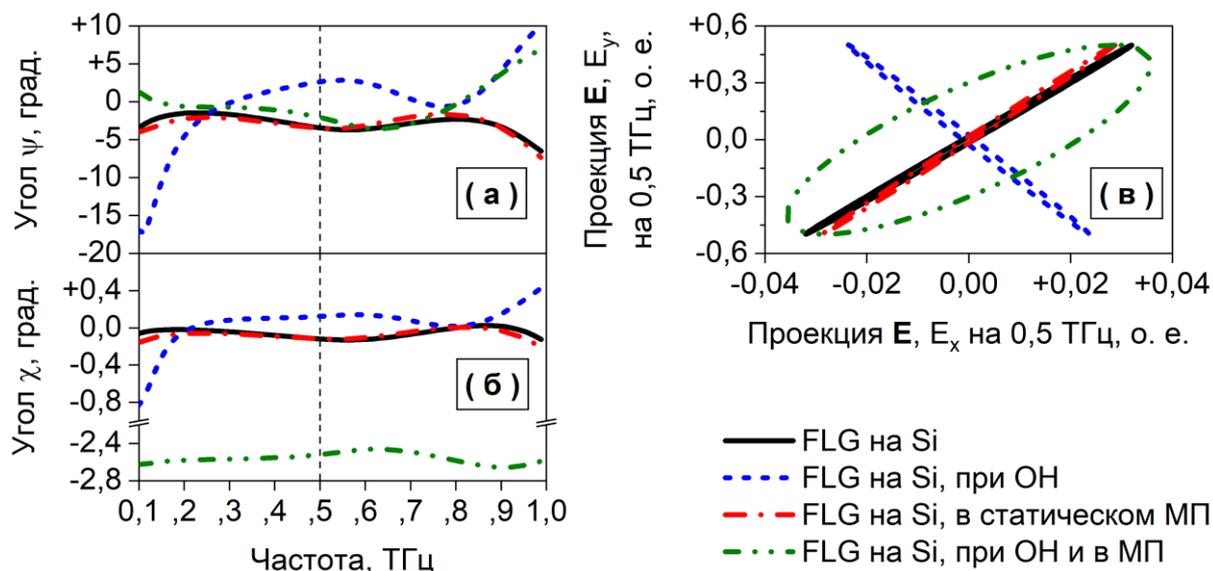


Рис. 3. Графики зависимости **(а)** азимутального угла ψ и **(б)** угла эллиптичности χ эллипса поляризации электромагнитных волн, прошедших через FLG на Si-подложке, в диапазоне частот 0,1–1,0 ТГц, и **(в)** эллипс поляризации на частоте 0,5 ТГц, при внешней ОН $\sim 1,0$ Вт/см² и во внешнем статическом МП $\sim 1,3$ Т

По полученным данным видно, что наиболее эффективным способом управления поляризационными состояниями FLG и SWCNT является одновременное использование ОН и статического МП. Сложная структура данных образцов, поверхность которых состоит из неупорядоченных углеродных элементов, оказывает большое влияние на изменение поляризационных состояний. Также, Si-подложка оказывает существенное влияние на изменение поляризационных свойств образцов, особенно в диапазоне частот 0,8–1,0 ТГц, что подтверждается формами поляризационного эллипса.

Изменения в углах эллипса поляризации являются результатом магнитооптического эффекта Фарадея. Поворот угла поляризации зависит от концентрации свободных носителей, которая может быть увеличена с помощью ОН и величины МП.

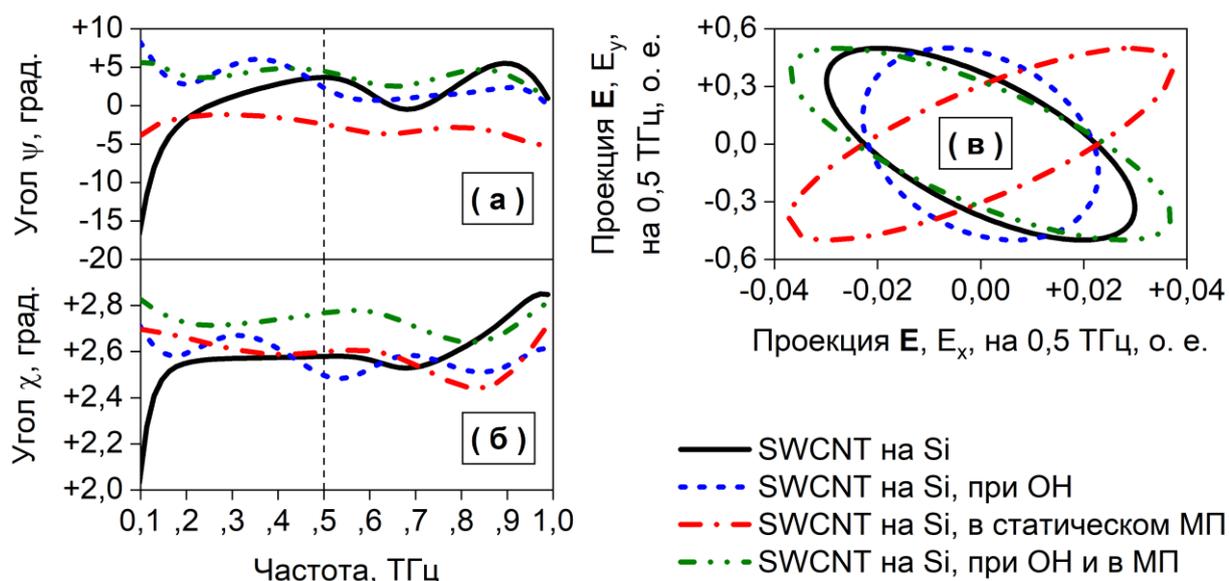


Рис. 4. Графики зависимости (а) азимутального угла ψ и (б) угла эллиптичности χ эллипса поляризации электромагнитных волн, прошедших через SWCNT на Si-подложке, в диапазоне частот 0,1–1,0 ТГц, и (в) эллипс поляризации на частоте 0,5 ТГц, при внешней ОН $\sim 1,0$ Вт/см² и во внешнем статическом МП $\sim 1,3$ Т

Заключение

В результате выполнения данного научного проекта было проведено исследование поляризационных состояний FLG и SWCNT в диапазоне частот 0,1–1,0 ТГц. Разработан оптико-электронный комплекс для исследования углеродных наноматериалов с помощью метода THz-TDP при внешней ОН и во внешнем статическом МП. Получены зависимости азимутального угла и угла эллиптичности эллипса поляризации для образцов.

Данные исследования являются важными для разработки перестраиваемых под внешними воздействиями ТГц поляризаторов, которые должны быть использованы в новейших системах связи и безопасности. Углеродные наноматериалы обладают уникальными оптическими и электронными свойствами, что позволяет на их основе создавать высокоэффективные ТГц поляризаторы с характеристиками, превышающими существующие аналоги. Разработанный в рамках данного проекта оптико-электронный комплекс для экспериментального исследования углеродных наноматериалов с помощью метода THz-TDP можно внедрить в учебный процесс Университета ИТМО и использовать при проведении лабораторных работ по тематике ТГц поляриметрии для подготовки бакалавров и магистров физических и оптических направлений.

Перспективным направлением дальнейшей разработки темы данного научного проекта является экспериментальное и теоретическое исследование поляризационных состояний FLG и SWCNT в ТГц диапазоне частот при различных значениях внешней ОН и внешнего статического МП.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, в рамках научного проекта № 713560 «Исследование композиционных материалов на основе биополимеров для перспективных медицинских приложений» (Грант № 08–08, Проект 5–100). Автор выражает большую благодарность сотрудникам

Университета ИТМО к.ф.-м.н. М.К. Ходзицкому, д.ф.-м.н., профессору А.В. Баранову, к.ф.-м.н. К.В. Богданову, а также коллективу соавторов.

Литература

1. The 2017 terahertz science and technology roadmap [Text] / S.S. Dhillon [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol.50. № 4. P. 043001. Mode of access : <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001> (access date: 14.11.2019).
2. Faraday effect control in graphene-dielectric structure by optical pumping [Text] / Grebenchukov A.N. [et al.] // Magn J. Magn. Mater. 2019. Vol. 472. P. 25–28. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.110> (access date: 14.11.2019).
3. Optically controlled dielectric properties of single-walled carbon nanotubes for terahertz wave applications [Text] / Smirnov S. [et al.] // Nanoscale. 2018. Vol. 10. Iss. 26. P. 12291–12296. Mode of access: <https://doi.org/10.1039/C8NR03740J> (access date: 14.11.2019).
4. Multi-layer graphene as a selective detector for future lung cancer biosensing platforms [Text] / Kovalska E. [et al.] // Nanoscale. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 2476–2483. Mode of access: <https://doi.org/10.1039/C8NR08405J> (access date: 14.11.2019).
5. Single-wall carbon nanotube film grown by advanced ethanol chemical vapor deposition process [Text] / Tonkikh A.A. [et al.] // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2012. Vol. 7. № 1. P. 99–101. Mode of access: <https://doi.org/10.1166/jno.2012.1226> (access date: 14.11.2019).
6. Methods of generating superbroadband terahertz pulses with femtosecond lasers [Text] / Bepalov V.G. [et al.] // J. Opt. Technol. 2008. Vol. 75. Iss. 10. P. 636–642. Mode of access: <https://doi.org/10.1364/JOT.75.000636> (access date: 14.11.2019).



Колодный Станислав Александрович
Факультет Физико-технический
E-mail: s.kolodny@metalab.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СПИНОВЫХ ВОЛН В ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ Au-YIG С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК

С.А. Колодный

Научный руководитель – д.ф.-м.н. И.В. Иорш

Аннотация

Проект посвящен исследованию нового метода резонансного оптического возбуждения спиновых волн в гибридных наноструктурах Au-YIG с помощью использования технологии частотных гребенок. Гибридная наноструктура рассмотрена на примере предложенной модели, состоящей из слоя золота (Au) с решеткой сверху и тонкой пленки иттриевого железного граната (YIG) внизу. Плазмоны, возбуждаемые фемтосекундными оптическими импульсами на длине волны плазмонного резонанса золота, создают сильное локализованное электромагнитное поле на интерфейсе Au-YIG. Эванесцентные электрические поля плазмонов, компоненты которых имеют фазовых сдвиг, индуцируют независимое от времени линейно поляризованное эффективное магнитное поле через поперечный магнитооптический эффект Керра (ТМОКЕ). Это магнитное поле вносит пертурбации в равновесное состояние магнетизации в иттриевом гранате и играет роль источника возбуждения спиновых волн в пленке YIG. Далее в проекте показано, что с использованием частотных гребней в качестве источника мы можем генерировать магнитную поляризацию в резонансе со спиновыми волнами в YIG, тем самым существенно увеличивая магнитооптический отклик системы. Текущие результаты проекта направлены на увеличения эффективности взаимодействия «свет-материя» и следующим шагом проекта является исследование магнитооптической нелинейности в такой модели, что является важной задачей в приложениях спинтроники.

Ключевые слова

Ферромагнетик, поверхностный плазмон, частотная гребенка, спиновая волна, магнон, резонанс.

Цель проекта – исследование резонансного взаимодействия магнонов и поверхностных плазмонов в гибридной наноструктуре Au-YIG, возбуждаемых фемтосекундными лазерными импульсами с помощью технологии частотных гребенок.

Задачи:

- разработать аналитическую и численную модели гибридной наноструктуры для исследования резонансного взаимодействия магнонов и поверхностных плазмонов;
- построить распределения электромагнитных полей в гибридной наноструктуре Au-YIG для определения частотно-пространственных параметров поверхностных плазмонов на границе раздела «металл-ферромагнетик»;

– определить частотно-пространственные характеристики магнонов, возбуждаемых цепочкой фемтосекундных лазерных импульсов;

– исследовать зависимость усиления амплитуды спиновых волн в зависимости от параметров возбуждающей частотной гребенки, исследовать характер прецессии вектора магнетизации в ферромагнетике под воздействием цепочки фс-лазерных импульсов.

Идеи и концепции, разработанные в области фотоники, были недавно применены в смежных областях, в частности в физике коллинеарных магнитов. Быстро развивающаяся область магنونика представляет собой фотонику со спиновыми волнами, что является собой коллективные возбуждения магнетизации в магнитных материалах. Благодаря их линейным и нелинейным свойствам [1] спиновые волны могут быть успешно применены в спинтронных устройствах следующего поколения и квантовых вычислениях. В настоящее время, дальнейшее применение технологии требует возбуждения спиновых волн на коротких длинах и временных масштабах. Это может быть достигнуто путем оптического возбуждения магнитной системы с фемтосекундными лазерными импульсами [2]. Несмотря на множество способов оптической генерации спиновых волн, нетепловые магнитооптические процессы, такие как обратный эффект Фарадея и обратный эффект Керра, имеют особое значение, поскольку они характеризуются высоким временным разрешением и не требуют нагревания образца. Суть эффекта заключается в том, что внешнее оптическое электрическое поле \mathbf{E} индуцирует магнитное поле $\mathbf{h} \sim \mathbf{E}^* \times \mathbf{E}$ через нелинейные процессы, такие как, например, вынужденное Рамановское рассеяние [3]. Таким образом, индуцированное магнитное поле возбуждает спиновые волны в магнитной структуре. В последнее время предполагалось, что в неоднородных средах выражение $\mathbf{E}^* \times \mathbf{E}$ может быть отличным от нуля даже для линейно поляризованной волны. В планарной геометрии этот эффект имеет место только для поляризации ТМ, а индуцированное магнитное поле перпендикулярно плоскости падения, реализуя при этом обратный *поперечный* магнитооптический эффект Керра (ТМОКЕ) [4]. Среди структур, которые позволяют обратный ТМОКЕ, существуют магнитоплазменные системы [5], поскольку они облегчают локализацию электрического поля и эффективная хиральность $\sigma \sim |\mathbf{E}^* \times \mathbf{E}| / |\mathbf{E}|^2$ поверхностного плазмонного поляритона может приближаться к единице.

Ясно, что в непрерывном волновом режиме индуцированное магнитное поле \mathbf{h} не зависит от времени, тогда как при фемтосекундных лазерных импульсах это поле следует профилю интенсивности. Поэтому гораздо более высокая эффективность генерации спиновых волн может быть достигнута в случае резонансного возбуждения, когда профиль интенсивности периодичен с частотой, близкой к частоте ферромагнитного резонанса, которая обычно составляет порядка 1 ГГц. Недавно было продемонстрировано экспериментально [6], что использование импульсного лазерного возбуждения может существенно повысить эффективность генерации спиновых волн на дне магнонной полосы с последующей их диффузией. Однако для прямой импликации в обработке данных жизненно важное значение имеет резонансное возбуждение спиновых волн с фиксированной как частотой, так и волновым вектором (и групповой скоростью).

В настоящем проекте предлагается комбинация магнитоплазмонической структуры и импульсного лазерного возбуждения для резонансного возбуждения спиновых волн и дальнейшего исследования резонансного взаимодействия спиновых волн и поверхностных плазмонов. Сначала проектируется структура и численно моделируется распределение электромагнитного поля при импульсном лазерном возбуждении. Используя данные, можно оценить индуцированное магнитное поле и динамику намагниченности, основанную на численном решении уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (LLG) [7].

Чтобы связать оптические волны (в виде плазмонов, например) со спиновыми волнами, в данной работе предлагается использовать золотую решетку, усиливающую электрическое поле и определяющую распределение поля из-за его сильной локализации при возбуждении

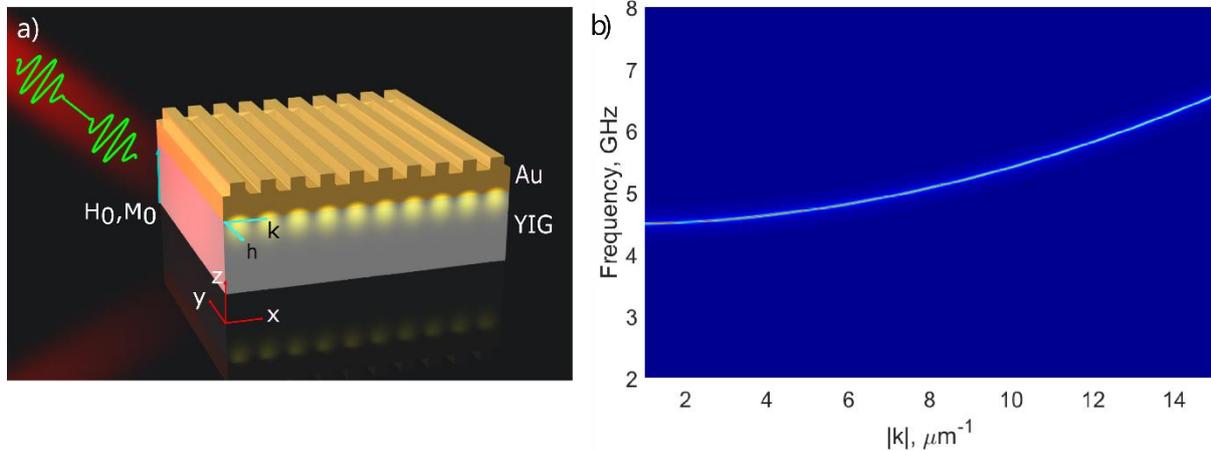


Рис. 1. (а) Схематическое представление рассматриваемого двухслойного структуры: тонкая пленка ферромагнитного YIG с намагниченностью \mathbf{M}_0 вдоль оси z , покрытая слоем золота с решеткой. Система помещается во внешнее магнитное поле \mathbf{H}_0 , направленное по нормали к границе раздела; и облучается лазерными импульсами с интенсивностью I и длительностью t , так что индуцированное магнитное поле \mathbf{h} в YIG перпендикулярно плоскости падения (xOz). Последнее связано с поверхностными плазмон-поляритонами, возникающими на границе. (б) Магнонное дисперсионное соотношение в YIG, полученное численным решением уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта на частоте плазмонного резонанса. Плазмонная решетка располагается на слое ферромагнитного материала YIG (см. рис. 1а), обладающего подходящими параметрами, такими как: малая величина константы гильбертова затухания и кубическая симметрия домена. Характерные частоты магнонов могут быть определены из стационарного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (Ур.1), для YIG эти частоты лежат в диапазоне 4-7 ГГц, что показано на рис. 1б.

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = [\mathbf{M} \times \mathbf{H}] + \left[\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right], \quad (1)$$

Параметры решетки (период и ширина элемента) позволяют определять распределение электромагнитного поля на границе раздела Au-YIG, и, как видно из рис. 2а, б, возбуждаемое электрическое поле имеет эллиптическую поляризацию и, в соответствии с уже упомянутым поперечным магнитооптическим эффектом Керра, будет создавать независящее от времени магнитное поле $\mathbf{h} \sim [\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*] / |\mathbf{E}|$ (рис. 2с).

Независящее от времени магнитное поле \mathbf{h} служит источником спиновых волн в соответствии с ур. 1, где суммарное магнитное поле представлено \mathbf{H} . Для внесения временной зависимости предлагается возбуждать плазмоны в наноструктуре цепочкой гауссовых импульсов с частотой повторения, выбранной в резонансе с частотой магнонов в тонкой пленке YIG. Полагается, что продолжительность каждого импульса составляет 40 пс, что гораздо меньше в сравнении с частотой повторения. Au-решетка позволяет генерировать электромагнитное поле с фиксированным значением волнового вектора $k=10^6 \text{ м}^{-1}$, таким образом, в полном соответствии с магнонной дисперсией YIG на Рис.1б резонансная частота спиновых волн в рассматриваемом магнитоплазмонном бислое составляет 4.8 ГГц. Для большей реалистичности характерный размер гибридной наноструктуры ограничен 1 мкм. Такую частоту повторения трудно достичь использованием только общих методов генерации

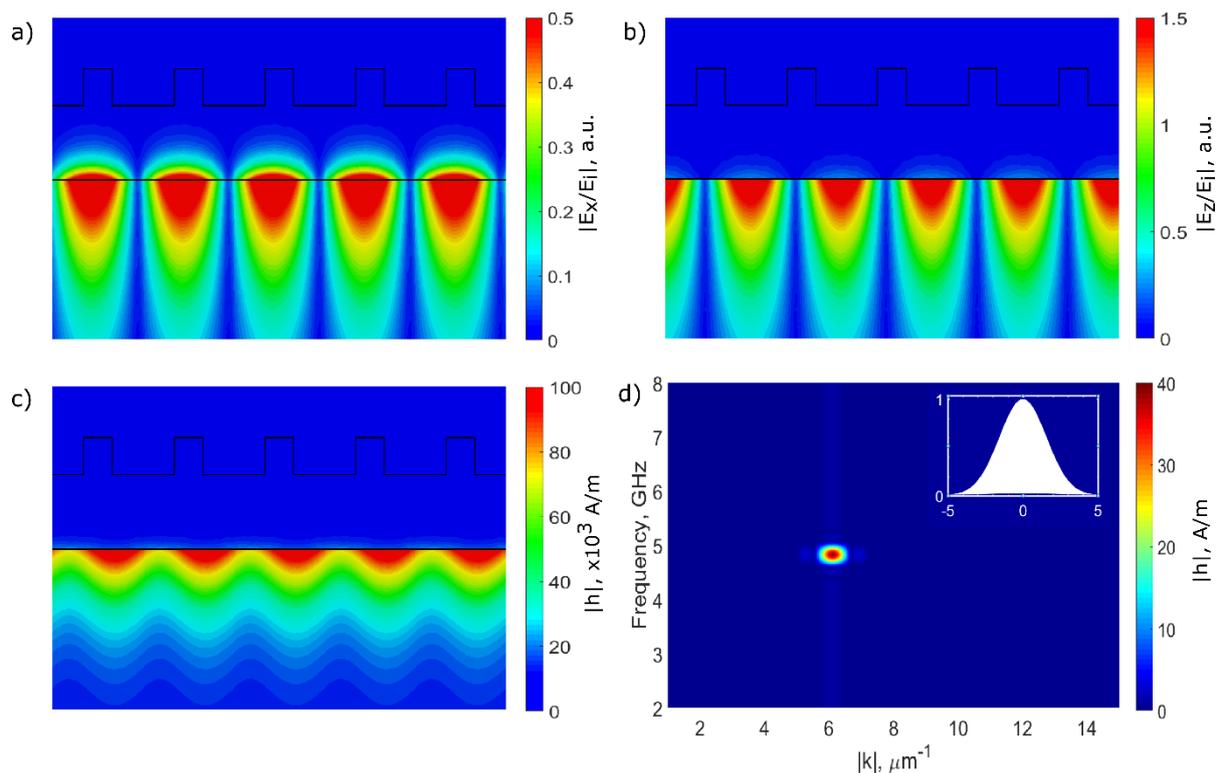


Рис. 2. Распределение компонент электрического поля E_x (a) и E_z (b) внутри гибридной наноструктуры, нормированное максимальным значением электрического поля. Наведенное магнитное поле $\mathbf{h} \sim \mathbf{E}^* \times \mathbf{E}$ сильно локализовано на интерфейсе Au-YIG (c) и нормировано максимальным значением поля. Дисперсия \mathbf{h} , созданная цепочкой фемтосекундных оптических импульсов с частотой повторения 4.8 ГГц (d). Примечательно, что в этих расчетах мы накладываем периодические граничные условия вдоль осей x и y

гауссовых импульсов. Но использование технологии частотных гребней позволяет преодолеть эту проблему путем генерации гауссовских импульсов с высокой частотой повторения вплоть до терагерцового диапазона. Дисперсия индуцированного магнитного поля состоит из дискретного множества «горячих» пятен, как показано на рис. 2d, это происходит из-за периодичности структуры и возбуждающих свойств частотных гребней.

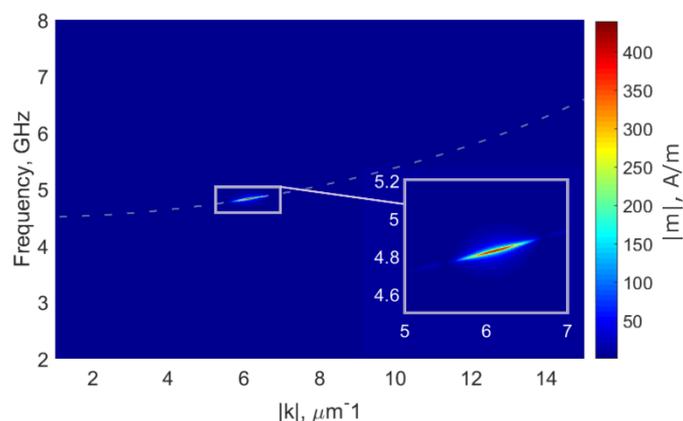


Рис. 3. Дисперсия магнона в гибридной наноструктуре Au-YIG. Белая пунктирная линия представляет собой дисперсионную линию спиновых волн в YIG

Далее, решая Ур.1 относительно малых возмущений намагниченности \mathbf{m} и полученного возбуждающего поля \mathbf{h} можно определить дисперсионную картину $\mathbf{m}(\omega, \mathbf{k})$, что посредством Фурье-преобразования даст временную и пространственную зависимость магнонов. Полученная дисперсия изображена на рис. 3. Как и ожидалось, «горячие» пятна существуют только при совпадении дисперсионных диаграмм возбуждающего магнитного поля и спиновых волн в YIG.

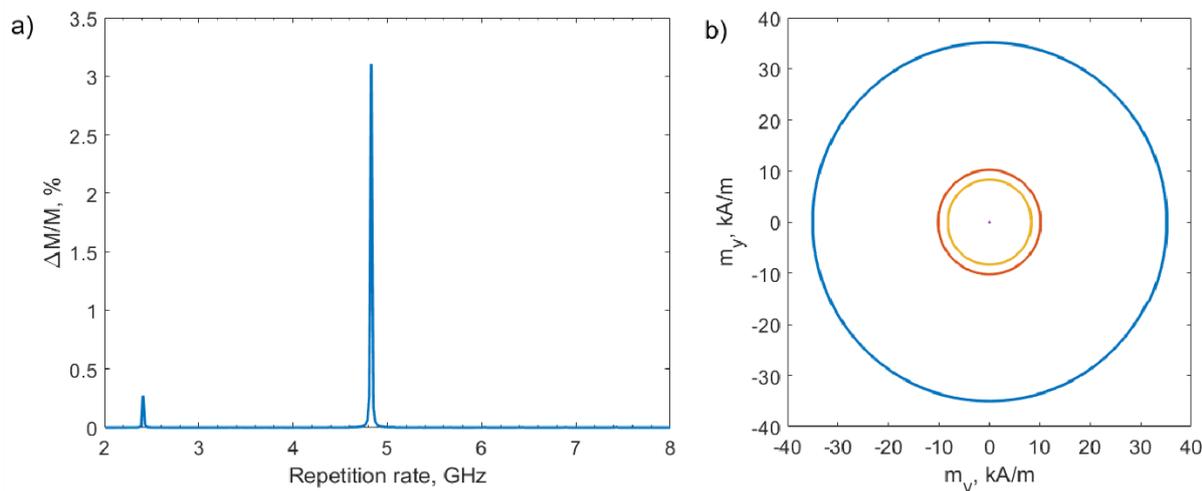


Рис. 4. а) Зависимость амплитуды прецессии от скважности посылаемых гауссовых пучков. б) Прецессия \mathbf{m} в x - y координатах. Синей линии соответствует резонансное возбуждение на частоте 4.8 ГГц, желтой – 4.78 ГГц, красной – 4.82 ГГц. Прецессия совершается против часовой стрелки

Кроме того, видно, что вследствие параметров YIG, возбуждаемые магноны будут иметь узкий частотный спектр, а их пространственная дисперсия всецело будет определяться плазменной решеткой. Также исследовалась зависимость $|\mathbf{m}|$ от частоты повторения фемтосекундных импульсов для фиксированных значений \mathbf{k} в диапазоне 2-8 ГГц для максимального значения возбуждающего магнитного поля \mathbf{h} (рис. 4а), из которой явно видно формирование резонансного режима возбуждения. Резонансный пик появляется на частоте 4.8 ГГц дополнительные пики более низких частот. Основные и дополнительные пики очень узкие из-за малого затухания спиновых волн в YIG, что описывается параметром затухания Гильберта, как уже упоминалось ранее. Дополнительно была построена прецессия намагниченности в резонансном режиме и вблизи него. В частности, результаты для цепочки из 50 гауссовских импульсов для указанных частот показаны на рис. 4б. Можно отметить, что при таких параметрах возбуждения прецессия намагниченности практически не затухает за время повторения импульсов.

Заключение

Результаты работы могут являться теоретической основой для дальнейшего проектирования магнитооптических устройств для задач спинтроники и оптоэлектроники. Резонансное взаимодействие плазмонов и магнонов представляет большой интерес в этих задачах за счет того, что ожидается более эффективное возбуждение магнонов за счет магнитного резонанса. Данное свойство влечет за собой снижение затрат энергии на генерацию магнонов и уменьшение нагрева образцов вследствие этого. Кроме того, магнитооптическая нелинейность может обладать интересными свойствами связи оптических полей и магнонов, что может быть применено в устройствах на чипе и квантовых вычислениях.

Литература

1. Demokritov S.O., Slavin A.N. (ed.). Magnonics: From fundamentals to applications. – Springer Science & Business Media. 2012. Т. 125.
2. Van Kampen M. et al. All-optical probe of coherent spin waves //Physical review letters. 2002. Т. 88. №. 22. С. 227201.
3. Popova D., Bringer A., Blügel S. Theoretical investigation of the inverse Faraday effect via a stimulated Raman scattering process //Physical Review B. 2012. Т. 85. №. 9. С. 094419.
4. Belotelov V.I., Zvezdin A.K. Inverse transverse magneto-optical Kerr effect //Physical Review B. 2012. Т. 86. №. 15. С. 155133.
5. Bossini D. et al. Magnetoplasmonics and femtosecond optomagnetism at the nanoscale //Acs Photonics. 2016. Т. 3. №. 8. С. 1385-1400.
6. Jäckl M. et al. Magnon accumulation by clocked laser excitation as source of long-range spin waves in transparent magnetic films //Physical Review X. 2017. Т. 7. №. 2. С. 021009.
7. Stancil D.D., Prabhakar A. Spin waves. New York: Springer. 2009. С. 364.



Мазур Яна Вадимовна
Факультет Прикладной оптики
E-mail: ianamazur@itmo.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОВЕРХНОСТЯМИ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ ФОРМИРУЮЩЕГО СЛОЖНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТА

Я.В. Мазур

Научный руководитель – доцент А.О. Вознесенская

Аннотация

В статье представлена разработка компьютерной модели оптической системы, включающей поверхности свободной формы, формирующей требуемое распределение света. В качестве примера создаётся элемент свободной формы, который позволяет сформировать требуемое изображение для любого объекта на основе закона Снелла и закона сохранения энергии. Оптическая конструкция элемента свободной формы использует трассировку лучей между объектом и изображением, описанным с помощью сложных схем распределения света.

Ключевые слова

Оптические поверхности свободной формы, компьютерное моделирование, геометрическая оптика, закон Снелла, распределение света.

Цель проекта – моделирование оптических поверхностей свободной формы, обеспечивающих преобразование заданного распределения света от источника в желаемое распределение света на экране.

Задачи:

- определить возможные формы распределения света для осветительной техники;
- разработать метод синтеза поверхностей свободной формы для изображающих и неизображающих систем;
- выполнить моделирование оптической системы, включающей линзу с двумя поверхностями свободной формы, формирующей желаемое распределение света;
- выполнить моделирование оптического элемента свободной формы, который формирует требуемое изображение.

Несмотря на огромный прогресс в оптике, особенно в течение последних 100 лет, подавляющее большинство всех оптических компонентов всё ещё основано на относительно простых поверхностных типах, которые могут быть математически описаны с небольшим количеством геометрических параметров. Поэтому требуемые оптические системы всегда характеризовались большим количеством оптических компонентов и связанными с ними высокими оптическими потерями. Область оптической обработки стремится к высокой оптической эффективности и, следовательно, к минимально возможному числу оптических компонентов. На современном рынке оплотехники особый статус получили оптические системы, включающие поверхности свободной формы, которые обеспечивают улучшенное качество систем и ведут к уменьшению количества оптических элементов.

Поверхности свободной формы имеют широкий спектр использования во множестве сфер промышленности. Например, они применяются:

- в изображающих оптических системах: монофокальные и прогрессивные очковые линзы, гибридные объективы, в системах виртуальной реальности;
- в неизображающих оптических системах: фонари, светофоры, светодиоды, оптические приборы в медицинской технике, фотогальванические концентраторы и др.

Поверхности Freeform были впервые использованы в задачах проектирования неизображающей оптики, цель которых состоит не в формировании изображения, а в максимизации эффективности передачи энергии. Поскольку системы без изображения не так чувствительны к ошибкам изготовления, многие оптические системы свободной формы стали коммерческими продуктами.

Стандартная проблема в светотехнике заключается в разработке оптической системы, которая преобразует заданное распределение источника света в желаемое распределение на экране. В проекте представлено моделирование системы, которая включает в себя линзу с двумя поверхностями свободной формы, формирующей целевое распределение света.

Методы исследования

Существует два основных подхода к проблеме достижения желаемого распределения света: прямой и обратный методы. В прямом методе вычисляется целевое распределение из исходного распределения и схемы оптической системы. Одним из таких методов является трассировка лучей. Данный метод прост в реализации, но он медленный, поскольку для точного целевого распределения требуется много лучей и трассировка лучей часто включается в процедуру проб и ошибок для вычисления правильного распределения. Обратный метод напрямую вычисляет оптическую систему, которая преобразует данное распределение источника в требуемое целевое распределение [1].

Основополагающими физическими принципами являются законы геометрической оптики и сохранения энергии. Законы геометрической оптики могут быть сформулированы в виде так называемой оптической карты, связывающей координаты в исходной и целевой областях. Подстановка оптической карты в закон сохранения энергии приводит к уравнению типа Монжа-Ампера для расположения оптической поверхности.

В настоящее время существует только несколько численных методов решения уравнения Монжа-Ампера. Рассмотрим источник света S в плоскости $z = 0$, экран T в плоскости $z = 1$ и промежуточный оптический элемент свободной формы (рис. 1). Первая поверхность линзы ($L1$) определяется соотношением $z = u_1(x)$ для $x \in S$, а вторая ($L2$) - $1 - z = u_2(y)$ для $y \in T$. В этой статье выберем декартовую систему координат для x (источник) и y (экран). Показатель преломления линзы равен n . Источник излучает параллельный пучок света, распространяющийся в положительном направлении z . Лучи света падают на первую линзовую поверхность $L1$, преломляются, падают на вторую поверхность $L2$, снова преломляются, создавая исходящий параллельный луч света, также в положительном направлении z .

Метод решения представляет собой двухэтапный алгоритм: сначала оптическая карта вычисляется путем минимизации дефекта ограничения энергии, а затем вычисляется местоположение поверхностей свободной формы. Вычисление карты является итерационной процедурой, которая требует численного решения задачи минимизации с ограничениями, которая может быть выполнена поточечно. Поэтому метод очень эффективен [2].

По итогам решения уравнения Монжа-Ампера обрабатываем исходное и целевое распределение света, вычисляем изображение трассировки лучей для проверки результата и проектируем оптическую систему (рис. 1) [3].

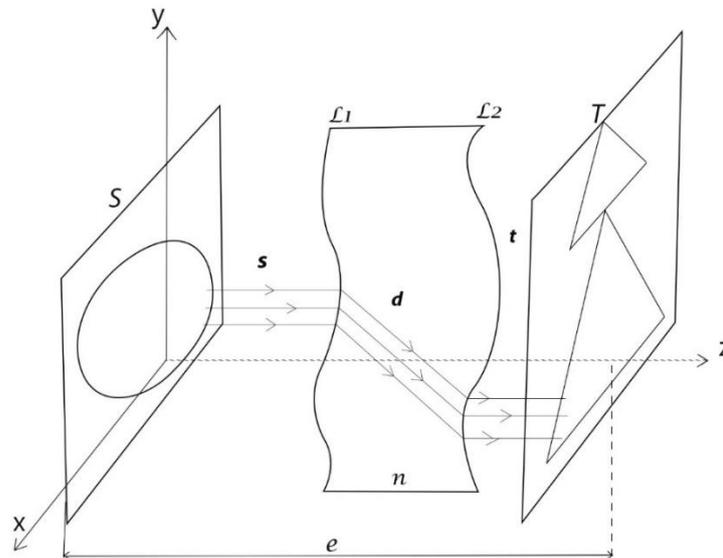


Рис. 1. Моделирование оптического элемента с поверхностями свободной формы при требуемом распределении света

Для определения математического выражения, описывающего точки, принадлежащие поверхности свободной формы, проведем луч от точки $(x, 0)$ на источнике до точки (y, l) на экране. Падающий луч имеет единичный вектор направления $s = e_z$, а единичный вектор направления преломленного луча внутри линзы задается векторной версией закона Снелла (формула для описания взаимосвязи углов падения и преломления волны, проходящей через границу двух изотропных сред):

$$t = \eta s - (\eta s \cdot \nu_1 + \sqrt{1 - \eta^2(1 - (s \cdot \nu_1)^2)}) \nu_1, \quad (1)$$

где $\eta = 1/n < 1$ и ν_1 – единичный вектор на $L1$, также в этом случае направленный на источник ($s \cdot \nu_1 < 0$).

После преломления на поверхности $L2$ луч снова параллелен оси z и попадает на экран при $z = l$. Таким образом, математическое выражение, описывающее точки, принадлежащие поверхности свободной формы $y = m(x)$ имеет вид [4]

$$m(x) = x + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} d(x), \quad (2)$$

где $d(x)$ – расстояние между $L1$ и $L2$, измеренное вдоль единичного вектора направления преломленного луча внутри линзы t .

Закон сохранения энергии (полная энергия изолированной системы остается постоянной) в этом случае выглядит так:

$$\int_A E(x) dA(x) = \int_{m(A)} G(y) dA(y), \quad (3)$$

где любое $A \subset S$ и набор точки $m(A) \subset T$. Вводя изменение в переменную $y = m(x)$, ограничение энергии становится

$$|\det(D\mathbf{m}(\mathbf{x}))| = \frac{E(\mathbf{x})}{G(\mathbf{m}(\mathbf{x}))}, \quad (4)$$

подставим $\mathbf{y} = \mathbf{m}(\mathbf{x})$ и дифференцируем по \mathbf{x} , получим:

$$CD\mathbf{m}(\mathbf{x}) = D^2u_1(\mathbf{x}) - D_{xx}c = P, \quad (5)$$

где $D_{xx}c$ – матрица Гессе от \mathbf{x} и где матрица $C = (c_{ij})$ определяется как:

$$C = D_{xy}c = \begin{pmatrix} c_{x_1y_1} & c_{x_1y_2} \\ c_{x_2y_1} & c_{x_2y_2} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Комбинируя два последних соотношения, получаем уравнение типа Монжа-Ампера:

$$\det(P(\mathbf{x})) = \det(D^2u_1(\mathbf{x}) - D_{xx}c(\mathbf{x}, \mathbf{m}(\mathbf{x}))) = \frac{E(\mathbf{x})}{G(\mathbf{m}(\mathbf{x}))} \det(C(\mathbf{x}, \mathbf{m}(\mathbf{x}))). \quad (7)$$

В заключение местоположение оптических поверхностей вычисляется из соотношения

$$\nabla_x c(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \nabla u_1(\mathbf{x}) = 0 \quad (8)$$

с определенным:

$$u_1(\mathbf{x}) + u_2(\mathbf{y}) = \iota - \frac{\beta}{n^2-1} - \frac{n}{n^2-1} \sqrt{\beta^2 - (n^2-1)|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^2} = c(\mathbf{x}, \mathbf{y}). \quad (9)$$

Наконец, рассчитаем вторую поверхность линзы после замены отображения m . В итоге мы имеем:

$$u_2(\mathbf{m}(\mathbf{x})) = c(\mathbf{x}, \mathbf{m}(\mathbf{x})) - u_1(\mathbf{x}). \quad (10)$$

Результаты

В результате поверхность свободной формы была смоделирована (рис. 2) в программном обеспечении Matlab для сигнального освещения. Преломляющая линза свободной формы предназначена для перераспределения интенсивности света от круга к квадрату. Входные данные – расстояние от источника до цели 100 мм, показатель преломления $n = 1,49358$, длина волны $\lambda = 550$ нм, телесный угол $\Omega = 45^\circ$ [5].

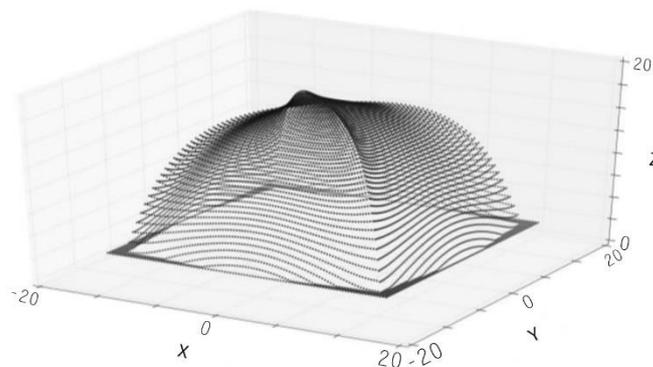


Рис. 2. Поверхность свободной формы, разработанная в Matlab

В будущем мы планируем выполнить моделирование элементов свободной формы, которые имеют более сложные формы распределения света. Например, преобразование распределения света из круга в конкретное изображение или из одного изображения в другое. На основе этого моделирования в будущем можно будет проектировать оптические системы с поверхностями свободной формы, например, для такой многообещающей области, как VR (виртуальная реальность).

Литература

1. Voznesenskaya A., Mazur I. Modeling of free-form optical surfaces for forming required light distribution // Proceedings of SPIE, IET, Vol. 10693, pp. 10693OH (2018).
2. Voznesenskaya A.O., Mazur Y.V., Krizskii P.Y. Interpolation equations of freeform refractive surfaces // Journal of Optical Technology, IET. Vol. 85, No. 9, pp. 579-581 (2018).
3. Mao X., Li H., Han Y., and Luo Y. Polar-grids based source-target mapping construction method for designing freeform illumination system for a lighting target with arbitrary shape // Opt. Express 23(4), 4313-4328 (2015).
4. Bruneton A., Bäuerle A., Wester R., Stollenwerk J., and Loosen P. Limitations of the ray mapping approach in freeform optics design // Opt. Lett. 38(11), 1945–1947 (2013).
5. Mazur I., Voznesenskaya A. Modeling of a freeform element with a variable light distribution // Procedia Computer Science Volume 156. 2019. Pages 37-42.



Нехороших Артём Николаевич
Факультет Систем управления и робототехники
E-mail: becks94@mail.ru

КОНЕЧНО-ВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА И КОМПЕНСАЦИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

А.Н. Нехороших
Научный руководитель – профессор И.Б. Фуртат

Аннотация

В статье рассматривается проблема стабилизации по выходу технического объекта при наличии параметрических неопределенностей и внешнего ограниченного возмущения. Предложенный закон управления нелинейно зависит от выходной величины и ее значений в предыдущие моменты времени. Показано, что такая система управления обеспечивает стабилизацию объекта в область, размеры которой определяются величиной вводимого запаздывания и амплитудой внешнего возмущения, за меньший промежуток времени по сравнению с его линейным аналогом. В статье приведены результаты математического моделирования, подтверждающие теоретические выводы и демонстрирующие робастность системы управления к параметрическим неопределенностям и внешним ограниченными возмущениям.

Ключевые слова

Нелинейное управление, управление по выходу, запаздывание, линейные матричные неравенства, практическая стабилизация

Цель проекта – разработка нелинейной системы управления по выходу параметрически неопределенным объектом, обеспечивающей полную компенсацию внешних возмущающих воздействий за конечное время.

Задачи:

- 1) разработать нелинейный закон управления по выходу с введением искусственного запаздывания цепочкой из n интеграторов;
- 2) обобщить полученные результаты на класс параметрически неопределенных систем;
- 3) синтезировать нелинейный наблюдатель внешнего возмущения;
- 4) исследовать устойчивость замкнутой системы и разработать алгоритм расчета параметров системы управления.

Введение

Стабилизация динамических объектов по выходу является одной из центральных проблем теории управления и ее практических приложений. Для линейных систем с относительной степенью большей единицы необходимо введение в закон управления производных выходной величины. В большинстве случаев эти сигналы не могут быть измерены напрямую, а только оценены с помощью дополнительных динамических систем, называемых «наблюдателями» [1]. Однако для систем управления реального времени с ограниченной вычислительной мощностью увеличение динамического порядка может быть критическим. Другим способом оценки производных является

использование значения выходной величины в данный и предшествующие моменты времени [2]. Для этого в замкнутую систему вводится искусственное запаздывание, которое, будучи достаточно малым, позволяет стабилизировать систему по выходу.

К тому же во многих прикладных задачах время, за которое должна быть достигнута цель управления, ограничено. Одним из традиционных методов ускорения переходного процесса является увеличение коэффициентов обратной связи. Однако в случае систем с запаздыванием данный метод имеет ограниченное применение: достаточно большая обратная связь может дестабилизировать замкнутую систему [3]. С другой стороны, если же система является однородной, то характер ее сходимости может быть однозначно определен только одним параметром: степенью однородности [4].

Задача синтеза нелинейного закона управления по выходу динамическим объектом второго порядка с введением искусственного запаздывания, позволяющего стабилизировать объект в заданной зоне быстрее, чем его линейный аналог, была решена в [5]. Целью данной работы является обобщение решения на систему произвольного динамического порядка.

Постановка задачи и синтез закона управления

В данной работе рассматривается технический объект, математическая модель которого описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{cases} x^{(n)}(t) = u(t) + f(x(t), d(t)) \\ y(t) = x(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния модели; $u(t) \in R$ – управляющее воздействие; $y(t) \in R$ – выходной сигнал; $f: R \times R \rightarrow R$ – функция, характеризующая влияние параметрических неопределенностей и внешнего возмущения; $d(t) \in R$ – внешнее ограниченное возмущение ($\sup_{t \in [0; +\infty)} |d(t)| \leq d_{\max}$); n – динамический порядок объекта.

Несмотря на то, что модель (1) является достаточно простой, она позволяет описать широкий класс объектов, так как все линейные управляемые системы и множество нелинейных могут быть сведены к этой форме.

Для решения поставленной задачи введем следующий закон управления:

$$u(t) = \sum_{j=1}^n K_j \left\langle \sum_{i=0}^{j-1} \frac{(-1)^i (j-1)!}{h^j (j-1-i)! i!} z_i(t) \right\rangle^{\alpha_j}, \quad (2)$$

где K_1, K, K_n – коэффициенты обратной связи; $h > 0$ – искусственное запаздывание, с; $\langle \cdot \rangle^{\alpha_j} = \text{sgn}(\cdot) |\cdot|^{\alpha_j}$; α_1, K, α_n – показатели степени, определяемые по формуле:

$$\alpha_j = \frac{1}{1 - (n+1-j)\mu}, \quad j = \overline{1, n},$$

где $\mu \neq 0$ – параметр, характеризующий отклонение от линейности закона управления, и

$$z_i(t) = \begin{cases} y(t-ih), & t > ih \\ y(0), & t \leq ih \end{cases}$$

Такой выбор закона управления *гарантирует* для достаточно малого $\mu \neq 0$:

1) глобальную (локальную из области начальных условий D) асимптотическую устойчивость окрестности начала координат A системы (1), (2), если $\mu < 0$ ($\mu > 0$);

2) переход из области S_1 ($S_1 \subseteq D$) в область $B_2 \supseteq A$ за минимальное время при $\mu < 0$ ($\mu > 0$) по сравнению с линейным аналогом, т.е. $\mu = 0$.

Доказательство данных утверждений, а также процедура нахождения коэффициентов обратной связи K_1, K, K_n для фиксированного параметра $\mu \neq 0$ приведены в [1]. Необходимо отметить, что размер области A прямо пропорционален величине вводимого запаздывания h и амплитуде внешнего возмущения d_{\max} , а области D – обратно пропорционален запаздыванию h .

Результаты математического моделирования

В качестве примера рассмотрим объект управления (1) с динамическим порядком $n=3$. Согласно Теореме 2, приведенной в [1], выбирая параметр $\mu = \pm 0,01$, решением системы матричных неравенств являются следующие коэффициенты обратной связи: $K^- = [-0,9737 \quad -2,4437 \quad -1,9272]$ и $K^+ = [-0,9656 \quad -2,4495 \quad -1,9441]$. Также принимая во внимание замечание 2 из [1], при $\mu = \pm 0,01$ вводимое искусственное запаздывание не должно превышать значения $h_{\max} = 0,0435$ с. Таким образом, оно может быть выбрано, например, равным $h = 0,025$ с.

На рис. 1 и 2 представлена в логарифмическом масштабе норма вектора состояния объекта $x(t)$, полученная в результате математического моделирования предложенной системы управления (1) и (2) (сплошная синяя линия) при $\mu = -0,01$ и $\mu = 0,01$ соответственно в случае отсутствия параметрических неопределенностей и внешних возмущений. Для демонстрации эффективности закона управления (2) на рисунках также приведены результаты моделирования линейного управления по выходу (сплошная красная линия), а также нелинейного и линейного управления по вектору состояния (пунктирные синяя и красная линия соответственно). Для корректности проводимого сравнения все параметры управления: μ , h и K_1, K, K_n – принимались одинаковыми для всех законов управления [6-10].

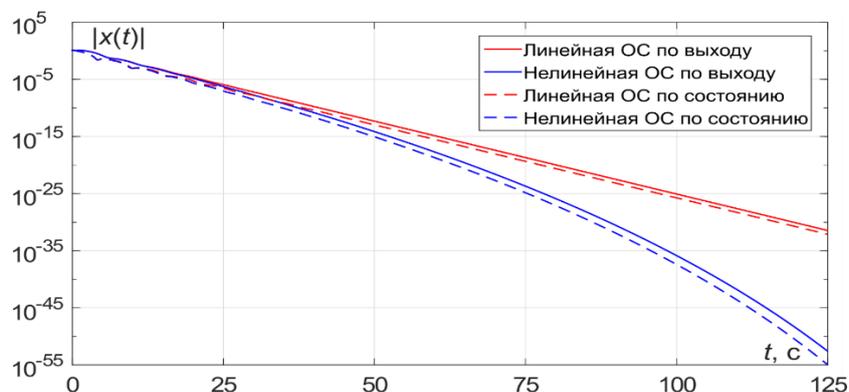


Рис. 1. Траектории стабилизированной системы при $\mu = -0,01$: ОС – обратная связь

Очевидно, что предложенный закон управления обеспечивает ускоренную сходимость по сравнению с линейным законом, если начальные условия выбраны достаточно малыми в случае $\mu < 0$ и – большими в случае $\mu > 0$. Также необходимо отметить, что использование закона управления по выходу (2) сравнимо с введением нелинейной обратной связи по вектору состояния.

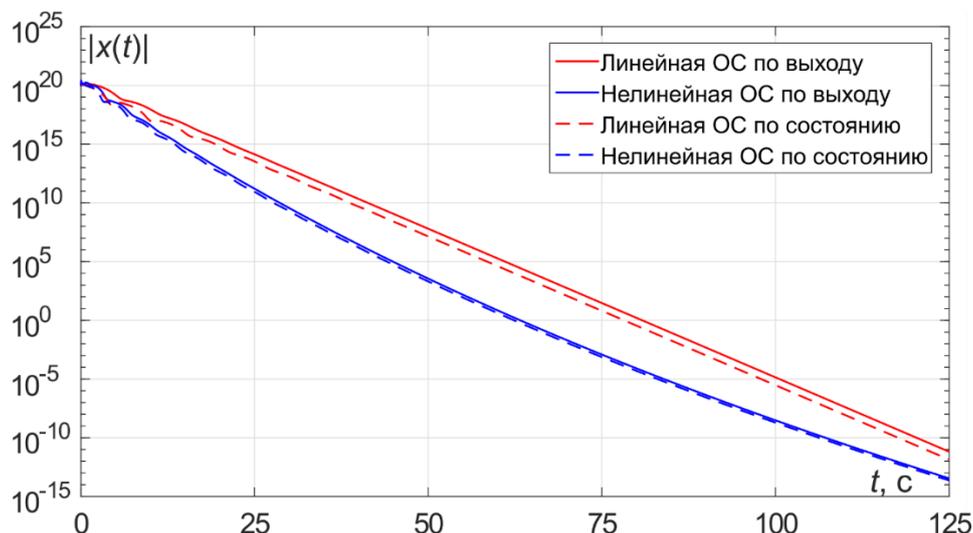


Рис. 2. Траектории стабилизированной системы при $\mu = 0,01$: ОС – обратная связь

Дополнительные результаты моделирования также показали, что предложенный закон управления робастен по отношению к параметрическим неопределенностям и внешним ограниченным возмущениям.

Заключение

В результате проделанной работы:

- разработан нелинейный закон управления по выходу объектом при наличии параметрических неопределенностей и внешнего ограниченного возмущения, позволяющий решить задачу стабилизации за меньшее время, чем при использовании линейного аналога;
- разработана процедура расчета параметров управления, основанная на решении линейных матричных неравенств;
- продемонстрирована эффективность полученной системы управления с помощью математического моделирования по сравнению с линейным аналогом;
- подготовлена статья для выступления на международном Всемирном конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению (IFAC World Congress) 2020.

В дальнейшем планируется разработать систему управления с изменяющимся параметром $\mu(y(t))$ для обеспечения сходимости за фиксированной промежуток времени (fixed-time stability).

Литература

1. Nekhoroshikh A.N., Efimov D.V., Polyakov A.E., Perruquetti W., Furtat I.B., Fridman E. On output-based accelerated stabilization of a chain of integrators: Implicit

- Lyapunov-Krasovskii functional approach // In proceedings of 21st IFAC World Congress, Berlin, Germany. 12–17 July. 2020 (under review).
2. Фуртат И.Б., Нехороших А.Н. Управление электрическим генератором в условиях высокочастотных помех измерения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2(114). С. 228–235.
 3. Furtat I.B., Nekhoroshikh A.N. Investigation of electric generator robust algorithm under measurement noises // Cybernetics and physics. 2018. Vol. 7. No. 4. P. 204–209.
 4. Фуртат И.Б., Нехороших А.Н. Робастное управление линейными мультиагентными системами с использованием левых разностей для оценки производных // Управление большими системами: Сборник трудов. 2017. № 65. С. 41–59.
 5. Furtat I.B., Nekhoroshikh A.N. Robust stabilization of linear plants under uncertainties and high-frequency measurement noises // 25th Mediterranean Conference on Control and Automation. MED 2017. 2017, P. 1275–1280.
 6. Khalil H.K. Nonlinear systems; 3rd ed. NJ: Prentice-Hall. 2002. P. 750.
 7. Selivanov A. and Fridman E. An improved time-delay implementation of derivative-dependent feedback // Automatica. 2018. Vol. 98. P. 269–276.
 8. Efimov D., Polyakov A., Fridman E., Perruquetti W., and Richard J.P. Comments on finite-time stability of time-delay systems // Automatica. 2014. Vol. 50. №. 7. P. 1944–1947.
 9. Lopez-Ramirez F., Efimov D., Polyakov A., and Perruquetti W. Fixed-time output stabilization and fixed-time estimation of a chain of integrators // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2018. Vol. 28. №. 16. P. 4647–4665.
 10. Efimov D., Fridman E., Perruquetti W., and Richard J.P. On hyper-exponential output-feedback stabilization of a double integrator by using artificial delay // In proceedings of 2018 European Control Conference (ECC), Limassol, Cyprus. 12–15 June, 2018. P. 1–5.



Николаев Андрей Сергеевич
Факультет Технологического менеджмента и инноваций
E-mail: nikand951@gmail.com

РАЗРАБОТКА ОТРАСЛЕВОГО СТАНДАРТА ПРОВЕДЕНИЯ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТРОЕНИЯ ПАТЕНТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

А.С. Николаев

Научный руководитель – профессор Е.Л. Богданова

Автором исследования предложены методические рекомендации по применению инструментария патентной аналитики и патентных ландшафтов в рамках развития отечественного фармацевтического кластера. Сформированные рекомендации позволяют адаптировать существующие международные и всероссийские стандарты в области патентной аналитики с учетом особенностей российской фармацевтики.

Патентные ландшафты являются частью современной системы управления сложными инновационными проектами, обеспечивая информационную поддержку при разработке и реализации инновационной политики организации. Патентный ландшафт представляет собой итог независимого аналитического исследования патентных документов и научно-технической литературы в выбранной предметной области, оформленный в графическом виде с использованием современной инфографики и технологий 3D моделирования. Инструментарий патентного ландшафта основывается на принципах обработки больших данных, включая как компьютерную обработку, так и экспертные методы [1, 3]. В условиях формирования в России цифровой экономики необходимо формирование прочной эмпирической основы для оценки роли и влияния патентной системы в отношении ключевых областей деятельности. Таким образом, возникает отдельный процесс, предшествующий принятию инвестиционного решения по развитию или переходу в новую технологическую область. Использование аутсорсинга для формирования индивидуального патентного ландшафта предприятия экономически оправдано, поскольку аналитические компании обладают не только необходимыми объемами данных, но и средствами их анализа [2, 3].

Важным этапом расширения практики применения данного метода является создание отраслевых рекомендаций для построения патентных ландшафтов, учитывающих особенности данной производственной сферы. Целью исследования являлась разработка подобного рекомендательного документа для фармацевтических предприятий Северо-Западного Федерального Округа.

В ходе проведенного исследования были определены основные тренды развития мировой фармацевтической индустрии, а также место российских предприятий в глобальном инновационном ландшафте, предложены ключевые направления применения инструментов патентной аналитики в области фармацевтики. Были определены основные требования к отчету о патентном ландшафте в интересах фармацевтического предприятия. Основу предлагаемого подхода составил перечень индикаторов силы и значимости патента в патентном портфеле предприятия,

разработанный на основании анализа практического опыта работы патентоведов по построению патентных ландшафтов, а также методологии проведения патентного анализа Всемирной организации интеллектуальной собственности. Полученный список индикаторов включает в себя общие индикаторы, относящиеся не только к фармацевтической отрасли, а также специальные критерии для оценки силы патента в фармацевтике. К общим критериям относятся:

1. Вид охраняемого объекта интеллектуальной собственности (патент на изобретение будет обладать большей силой, чем патент на промышленный образец);
2. Авторский коллектив (научные центры и лаборатории, участвующие в создании результата интеллектуальной собственности);
3. Широта «покрытия» патента внутри выбранного патентного сегмента (обеспечивается ли «зонтичная защита»);
4. Наличие производных патентов (позволяют усилить защиту разработки);
5. Уровень патентного цитирования (сила патента будет выше у системно-значимой разработки, ставшей центром патентного цитирования);
6. Судебная история патента (обжалования и случаи нарушения прав снижают силу патента);
7. Объемы лицензирования (показатель востребованности разработки);
8. Географический охват (позволяет повысить силу патента за счет развитой географии присутствия);
9. Размеры патентного семейства [4];
10. Процент невыданных патентов на национальной фазе (отрицательное решение хотя бы в одной юрисдикции снижает силу патента);
11. Процент поддерживаемых в силе патентов в патентном портфеле компании (характеризует патентную стратегию организации).

Следует отметить, что рассмотренные общие индикаторы силы патента могут быть применимы не для всех областей патентования. Именно поэтому в рамках методики предлагается учитывать отраслевые критерии для определения силы патента в фармацевтике. Так вид объекта патентования предлагается оценивать по категориям: субстанция, готовая лекарственная форма, назначения, комбинация веществ и способ производства. Наиболее сильным будет патент на фармацевтическую субстанцию, так как данный документ будет охранять основу лекарственного препарата. В аспекте лекарственных форм возможны вариации – капсулы, таблетки, порошки, мази, спреи, сиропы и другие твердые и жидкие формы [5]. Кроме того, при оценке географии патентования разные регионы мира предлагается ранжировать по степени важности. Так, патент, полученный на ведущих фармацевтических рынках мира – в Европейском союзе, США и Бразилии будут более ценными по сравнению с результатами патентования в Турции и Южной Корее. Ранжирование рынков интеллектуальной собственности связано с уровнем развития отечественной промышленности, а также потребностями населения в конкретных лекарственных препаратах. Так рынки Тайваня, Мьянмы, Тайланда и Сингапура также обладают высокой привлекательностью для выведения на них новых препаратов российскими компаниями.

Важными характеристиками силы патента в фармацевтике станет полнота описываемых веществ в патенте и количество независимых пунктов в формуле изобретения, объемы раскрытия каждого из заявленных пунктов формулы (по лекарственной форме и дозировке веществ). Также предлагается введение понижающих коэффициентов для патентов, выданных на воспроизведенные лекарственные препараты (дженерики), способных показать вторичность данного патента по отношению к оригинальным препаратам [6-13].

Указанный перечень критериев для оценки силы патента может быть дополнен при использовании в интересах конкретной организации или для отдельной отрасли. Следует отметить, что оценка силы патента в фармацевтике на данном этапе не автоматизирована, поскольку сохраняется необходимость привлечения отраслевого эксперта для определения качества формул изобретения, поскольку для этого требуются специальные знания в области технологии производства лекарственных средств.

Силу патента предлагается измерять в единицах, а результаты оценки разделять на пять групп: слабая сила патента (меньше 4), низкая сила (от 4 до 9), средняя сила (от 10 до 24), нормальная сила (от 24 до 39) и высокая сила патента (от 40 и выше).

Предложенная методика оценки силы патентов в фармацевтике может быть доработана для расчета показателя силы лекарственного препарата, которая складывается из силы патентов на изобретения, полезную модель (упаковка), промышленный образец (устройства для инъекций) и силы товарного знака.

В результате определения силы патентов можно ранжировать все имеющиеся нематериальные активы компании по данному критерию, выявляя таким образом наиболее важные и значимые инновационные ресурсы организации, которые могут стать основой будущего развития.

Предложенная методика построения патентных ландшафтов в фармацевтике прошла апробацию на базе фармацевтической компании «ГЕРОФАРМ», являющейся лидером в области производства инсулинов, а также развивающей свой портфель оригинальных и воспроизведенных лекарственных препаратов. Проведенные патентные исследования позволили сформировать новые стратегические направления развития компании в области выхода на новые рынки с уже имеющимися препаратами и принятия решений по разработке новых лекарственных средств.

Для организации гибкого управления фармацевтическим предприятием в условиях реализации избранной патентной стратегии и в целях организации эффективной работы патентных отделов российских фармацевтических предприятий необходимо создать отраслевое методическое руководство по проведению патентного анализа в интересах компаний – участников отечественного фармацевтического рынка. В данном документе должны быть обобщены лучшие практики патентоведов, а также предложены оптимальные методы группировки и визуализации патентных данных для применения именно в сфере фармацевтики. Формирование подобных рекомендаций является одной из приоритетных задач, поставленных перед автором настоящего исследования. Завершение работы по созданию проекта данного документа намечено на первый квартал 2020 года.

Литература

1. Bogdanova E., Maksimova T., Nikolaev A.S., Antipov A.A. Innovation Management in the Organization Using Patent Analytics Tools in the Analysis of the Competitive Environment // Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference (IBIMA). Innovation Management and Education Excellence through Vision 2020 2018, pp. 6856-6863.
2. Николаев А.С. Особенности управления инновационной деятельностью фармацевтического предприятия на основе патентных ландшафтов // Теория и практика общественного развития. 2019. № 9(139). С. 17-21.
3. Николаев А.С. Анализ бизнес-среды компании с помощью программных средств обработки патентной информации и построения патентных ландшафтов // Общество: политика, экономика, право. 2018. № 4. С. 37-40.
4. Николаев А.С., Гокинаева И.А. Проблемы определения силы и значимости

- патента как ключевого актива инновационного предприятия // Финансовая экономика. 2019. № 2. С. 747-750.
5. Алнафра И., Николаев А.С., Богданова Е.Л. Применение методов машинного обучения в системе управления интеллектуальной собственностью на основе технологии блокчейн // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2019. № 2(76). С. 9-14.
 6. Николаев А.С. Управление инновационной деятельностью предприятия с помощью методов патентной аналитики и патентных ландшафтов // Экономика. Право. Инновации. 2019. № 2. С. 49-55.
 7. Николаев А.С. Информационная и методологическая основа использования патентных данных при анализе конкурентной среды организации // Экономика, Право, Инновации. 2018. № 4(1). С. 46-49.
 8. Николаев А.С. Патентные ландшафты как инструмент повышения конкурентоспособности предприятия в цифровой экономике // Цифровая экономика в социально-экономическом развитии России (С-Пб., 24ноября 2017г.). 2018. С. 209–213.
 9. Anthony Trippe. Guidelines for Preparing Patent Landscape Reports. World intellectual Property Organization. Official publication. 2015, p. 131.
 10. Котлов Д.В. Патентный ландшафт как средство поиска перспективных разработок в России и за рубежом // ИС. Промышленная собственность. 2016. Спецвыпуск. С.43-48.
 11. Журавлёв Д. А. Построение патентных ландшафтов как инструмент принятия эффективных решений в сфере научных исследований и разработок / Журавлев Д.А., Мурашова С.В., Литвинов А.И. // Научный журнал «Человек и образование». № 2. 2018. С. 182–188.
 12. Методические рекомендации по подготовке отчетов о патентном обзоре (патентный ландшафт). Утверждены приказом Роспатента от 23 января 2017 г. № 8.
 13. Трофимова Е. О., Золотарева Н. Г., Наркевич И. А. Управление и экономика фармации: учебник для использования в учебном процессе образовательных организаций, реализующих программы высшего профессионального образования по специальностям 33.05.01 «Фармация», 33.08.02 «Управление и экономика фармации» / [Трофимова Е. О., Золотарева Н.Г., Наркевич И.А. и др.]; под ред. профессора Наркевича И.А. Москва: ГЭОТАР-Медиа. 2017. 923 с.



Орехова Мария Кирилловна
Факультет Прикладной оптики
E-mail: marorekhova@gmail.com

РАЗРАБОТКА СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОЛЯ

М.К. Орехова

Научный руководитель – доцент А.В. Бахолдин

Аннотация

В работе разобраны схемные решения зеркальных оптических систем модуля интегрального поля для солнечного телескопа-коронографа (диаметр главного зеркала 3 метра), ведущего работу в широком спектральном диапазоне: 0,39-1,60 мкм. Дано описание метода спектроскопии интегрального поля, показан алгоритм деления изображения посредством модуля интегрального поля. Представлена классификация оптических систем деления поля (массив микролинз, оптическое волокно, плоские зеркала), произведен анализ каждого типа систем. Показаны схемы одноступенчатого и двухступенчатого деления поля, приведены их достоинства и недостатки. Приведены различные варианты оптических компонентов для построения модуля интегрального поля: с использованием плоских и параболических зеркал, а также результаты их сравнения.

Ключевые слова

Модуль интегрального поля, оптический делитель поля, спектроскопия интегрального поля, панорамная спектроскопия, высокое пространственное разрешение, исследования Солнца.

Целью научного проекта является разработка схемного решения модуля интегрального поля для солнечного телескопа-коронографа с достижением спектрального разрешения не ниже 300000 и пространственного разрешения не ниже 0,1".

Задачами проекта являются:

- предложение принципиальной схемы метода панорамной спектроскопии;
- выбор метода деления поля в пользу наиболее эффективного;
- поиск схемных решений оптических систем модулей интегрального поля;
- анализ предложенных схемных решений.

Как правило, классические длиннощелевые спектрометры состоят из входной щели, коллимационного объектива, диспергирующего элемента и проекционного объектива. Классическая спектроскопия решает проблему высокого спектрального разрешения, но не пространственного, которое определяется поперечным размером входной щели. Существует понятие нормальной щели шириной b_0 [1]:

$$b_0 = \frac{\lambda \cdot f_1}{a},$$

где λ – длина волны, f_1 – фокусное расстояние коллиматора, a – ширина сечения светового пучка. Нецелесообразно вести работу как со щелью, ширина которой много уже b_0 , поскольку в данном случае происходит существенная потеря энергии, так и со щелью шириной много больше b_0 , потому что дифракционные изображения каждой ее точки налагаются друг на друга и происходит ухудшение пространственного разрешения.

Для достижения высокого пространственного разрешения наравне со спектральным в приборах астрономической оптики могут быть применены системы, построенные по методу спектроскопии интегрального поля.

Спектроскопия интегрального поля (или панорамная спектроскопия) – это область в астрономии, которая позволяет собрать информацию о спектре двумерного поля с максимально высоким спектральным разрешением и пространственным в том числе. Это происходит за счёт оптического деления поля на пиксели, которые являются предметом для спектрометра. Таким образом, после прохождения спектрометра, на приемнике формируется информация о спектре каждого пикселя поля. Независимо от метода деления поля на выходе получается трехмерный куб данных (две пространственные координаты и одна спектральная).

На сегодняшний день только начинают реализовываться такие проекты, как: MuSiCa [2], MUSE [3], FISiCa [4], разрабатываемые по методу панорамной спектроскопии. На сегодняшний день не существует подобных реализованных систем для исследования Солнца в широком спектральном диапазоне (0,39-1,60 мкм).

Схематично метод интегрально-полевой спектроскопии представлен на рис. 1. Зеркальная система Грегори [5] 2 формирует изображение части Солнца 1 диаметром 2". Полевая диафрагма (ПД) 3 перед модулем интегрального поля 4 (МИП) «вырезает» в фокальной плоскости телескопа поле прямоугольной формы размером 1,2 мм x 2,3 мм, что соответствует угловому размеру 6" x 12" в пространстве предметов. Далее МИП 4 преобразует двумерное поле прямоугольной формы в набор длинных щелей 5, которые являются предметом для спектрометра 6. Спектрометр 6 в дальнейшем формирует спектральные изображения 7 исследуемой части Солнца в диапазоне длин волн 0,39-1,60 мкм.

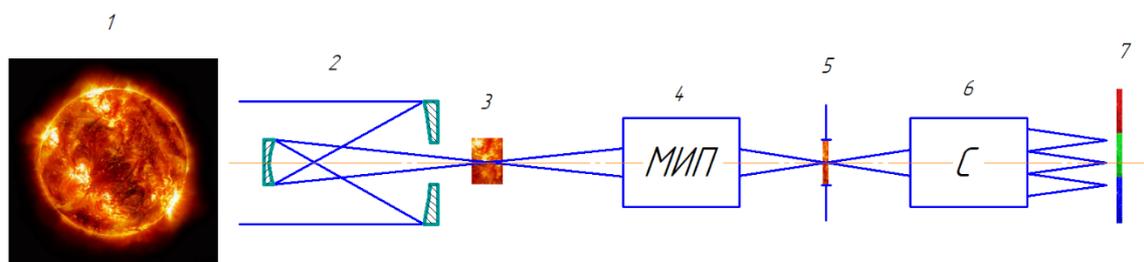


Рис. 1. Схема метода панорамной спектроскопии: 1 – исследуемый объект (Солнце),
2 – зеркальная система Грегори, 3 – ПД, 4 – МИП, 5 – набор длинных щелей,
6 – спектрометр, 7 – спектральные изображения щелей

Деление поля может быть осуществлено с помощью следующих оптических элементов:

1. массив микролинз;
2. оптическое волокно (как правило, применяется совместно с массивом микролинз);
3. плоские зеркала.

Существенными недостатками использования первых двух методов (с помощью массива микролинз или посредством оптического волокна) является сложность работы в широком спектральном диапазоне. Задача данной работы – обеспечить возможность

исследования солнечной структуры в спектральном диапазоне от 0,39 до 1,60 мкм. Построение модуля интегрального поля с использованием массива плоских зеркал делает выполнимым задачу изучения Солнца без дополнительных элементов (к примеру, введения интерференционного фильтра для ограничения спектра). Помимо этого, недостатком применения оптического волокна для деления поля является существенная потеря света между линиями волокна из-за их круглой формы и оболочки. Таким образом, для деления поля в данной работе был выбран метод с плоскими зеркалами. Это компактное, элегантное и высокоэффективное решение, которое позволяет решить многие из критических недостатков других альтернативных конструкций для МИП. При использовании зеркального делителя поля нет перекрывания спектров, как в случае микролинз, и у него отсутствуют недостатки, связанные с оптическими волокнами, такие как ухудшение фокального отношения, потери при передаче инфракрасных длин волн и деполяризационная природа волокон в целом.

Схемное решение для построения оптической схемы одноступенчатого деления поля представлено на рис. 2. Для деления изображения в фокальной плоскости телескопа устанавливаются плоские зеркала, расположенные под разными углами, которые отклоняют (и таким образом оптически разделяют) изображение на равные части, располагая их друг над другом и формируя длинную щель, являющуюся предметом для спектрометра.

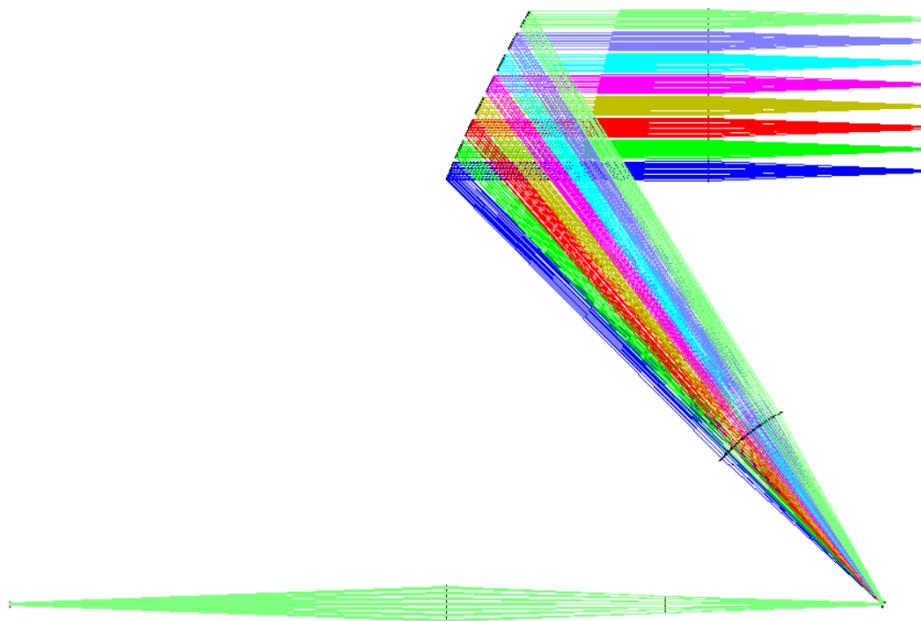


Рис. 2. Модель делителя поля второй ступени

Главное достоинство применения одноступенчатой схемы МИП – простота решения. Однако с ее помощью невозможно осуществить деление изображения на большое количество субизображений, и, соответственно, пространственное разрешение в этом случае будет ниже. Для достижения более высокого пространственного разрешения возможно использовать двухступенчатую схему МИП, что рассмотрено далее. Для этого перед схемой деления поля, показанной на рис. 2, располагают дополнительную систему деления поля.

Дополнительная ступень деления поля оптически делит его на нужное количество равных частей, каждая из которых при помощи плоских зеркал отклоняется под

определенным углом для последующей реализации второй ступени деления. Схемное решение для деления поля первой ступени показана на рис. 3.

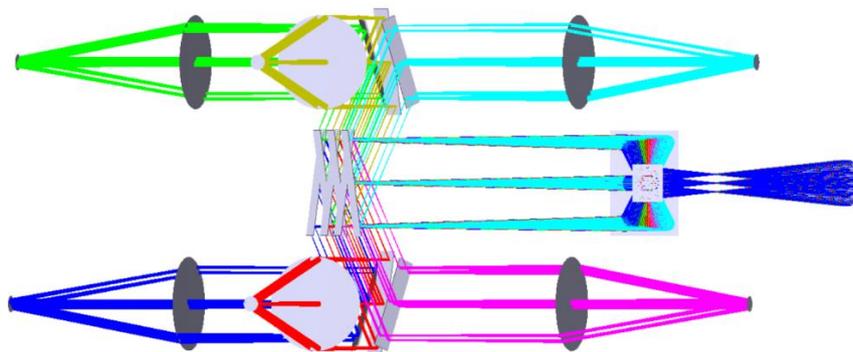


Рис. 3. Схемное решение для 1 ступени модуля интегрального поля
(с использованием плоских зеркал)

Для оптического разбиения изображения на равные части возможно применить и иную схему, представленную на рис. 4а. В данной системе для деления поля использованы параболические зеркала. «Вырезанный» диафрагмой из поля телескопа световой пучок отражается от массива плоских, расположенных на параболической кривой, зеркал (рис. 4б). Далее разбитый на равные части пучок телескопа попадает на цельное параболическое зеркало для передачи его на вторую ступень деления поля.

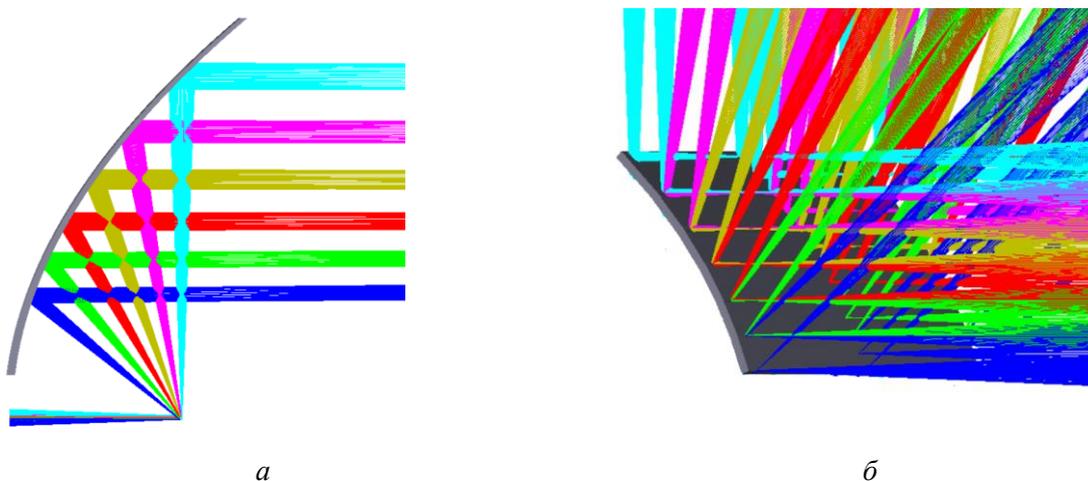


Рис. 4. Схемное решение для 1 ступени модуля интегрального поля
(с использованием параболических зеркал)

Достоинством схемного решения, показанного на рис. 3, является меньшее количество компонентов, однако конструкция элементов – достаточно сложная. Их позиционирование в пространстве требует работ более высокого уровня. В том числе недостатком этой схемы является сложность изготовления поверхностей в связи их децентрировкой и асферизацией. Схемное решение, показанное на рис. 4, имеет большее количество оптических элементов, но его достоинством является их простота.

Для переноса изображения, построенного в фокальной плоскости телескопа, необходимо ввести зеркальный объектив между оптической системой телескопа и массивом зеркал МИП. Оптическая схема такого объектива изображена на рис. 5. Он состоит из двух внеосевых параболических зеркал. Для минимизации aberrаций,

даваемых внеосевыми зеркалами, необходимо рассчитать координаты центра $(z_m; y_m)$ смещенной апертуры зеркала.

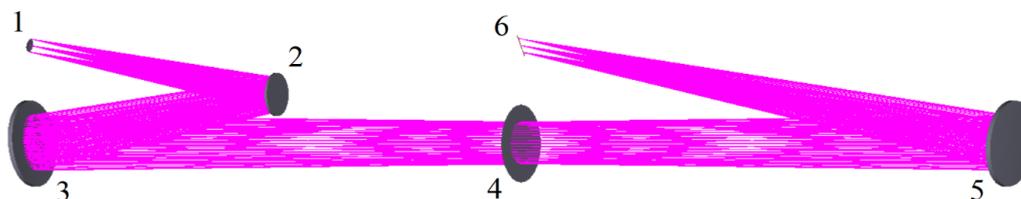


Рис. 5. Оптическая схема объектива перед массивом зеркал делителя:
1 – фокальная плоскость телескопа, 2 – плоское зеркало, 3 – параболическое зеркало,
4 – апертурная диафрагма, 5 – параболическое зеркало, 6 – плоскость зеркал делителя

На рис. 6 изображена схема к расчету координат центра $(z_m; y_m)$ смещенной апертуры внеосевого зеркала. Для поиска значений необходимо решить систему уравнений, состоящую из уравнений параболы ON и прямой FM . Уравнение параболы:

$$y^2 = 2r_0z,$$

где r_0 – радиус кривизны при вершине зеркала.

Из треугольника FMz_m :

$$\tan(-\alpha) = y_m / (-f' + P),$$

где α – угол между центральным лучом смещенной апертуры зеркала и осью, f' – его фокусное расстояние.

Таким образом,

$$\begin{cases} y_m^2 = 2r_0P \\ \tan(-\alpha) = y_m / (-f' + P) \end{cases} \quad (1)$$

система уравнений, с помощью которой возможно рассчитать координаты центра $(z_m; y_m)$ смещенной апертуры зеркала.

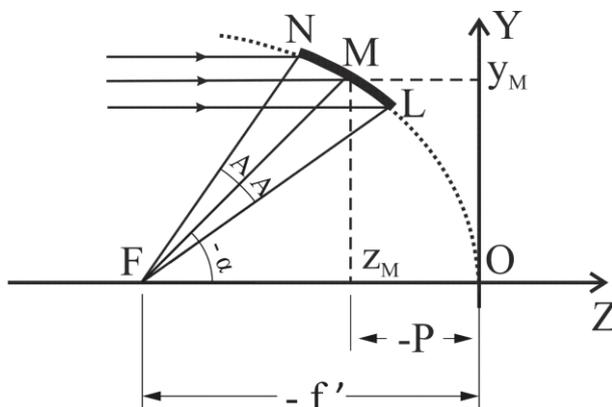


Рис. 6. Схема к расчету координат центра смещенной апертуры зеркала

Для поиска значения рабочей апертуры внеосевого параболического зеркала необходимо повторить расчет по системе уравнений (1), прибавив (для поиска проекции точки N на ось Y) или отняв (для поиска проекции точки L на ось Y) значение апертуры светового пучка к углу α .

Таким образом, в результате выполнения научного проекта:

- предложена принципиальная схема метода панорамной спектроскопии;
- выбран метод деления поля посредством плоских зеркал, так как он обеспечивает наибольшую разрешающую способность, энергетическую эффективность, а также дает возможность работать в широком спектральном диапазоне;
- выполнен поиск схемных решений оптических систем модулей интегрального поля;
- произведен анализ предложенных схемных решений.

Литература

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Изд. 2-е, доп. и перераб., Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние). 1975.
2. Calcines A.; López R.L.; Collados M., "MuSICA: the Multi-Slit Image Slicer for the EST Spectrograph", *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2, 1350009. (2013).
3. Francois Henault, Roland Bacon, Robert Content, Blandine Lantz, Florence Laurent, Jean-Pierre Lemonnier, and Simon L. Morris "Slicing the universe at affordable cost: the quest for the MUSE image slicer", *Proc. SPIE 5249, Optical Design and Engineering*, (18 February 2004); doi: 10.1117/12.512397.
4. Stephen S. Eikenberry, Richard Elston, Rafael Guzman, Jeff Julian, S. Nicholas Raines, Nicolas Gruel, Glenn Boreman, Paul E. Glenn, C. Gregory Hull-Allen, Jeff Hoffman, Michael Rodgers, Kevin Thompson, Scott Flint, Lovell Comstock, and Bruce Myrick "FISICA: the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics", *Proc. SPIE 5492, Ground-based Instrumentation for Astronomy*, (30 September 2004); doi: 10.1117/12.549150.
5. Демидов М.Л., Григорьев В.М., Чупраков С.А., Колобов Д.Ю., Скоморовский В.И., Ковадло П.Г., Пуляев В.А., Проект национального российского крупного солнечного телескопа с диаметром зеркала 3 м. // X Российско-Монгольская конференция "солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона" (Монголия, 29 сентября-04 октября 2014 г.). 2015. С. 55-67.



Рочас Станислав Станиславович
Факультет Лазерной фотоники и оптоэлектроники
E-mail: stanislav_rochas@itmo.ru

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ФОТОПРИЕМНИКА БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПЕРВОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ КВАРЦЕВОГО ОПТОВОЛОКНА

С.С. Рочас

Научный руководитель – профессор А.Ю. Егоров

Аннотация

Работа участника конкурса посвящена разработке высокочувствительного фотоприемника (ФП) ближнего инфракрасного диапазона. В процессе работы было проведено математическое моделирование и расчеты для проверки рабочих характеристик, и подтверждена работоспособность кристаллов фотоприемника. Была разработана технологическая карта для изготовления кристаллов ФП из полупроводниковой гетероструктуры, изготовленной методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs. Был разработан комплект фотошаблонов для p-i-n ФП и для резонансного p-i-n ФП, а также разработана и апробирована методика испытаний рабочих характеристик выращенных опытных образцов. Полученные значения темнового тока и фоточувствительности 1,45 нА и 0,6 А/Вт, соответственно, свидетельствуют о высокой эффективности разработанного устройства.

Ключевые слова

Алюминий, мышьяк, галлий, диодный переход положительный-собственный-отрицательный (positive-intrinsic-negative), волоконно-оптические линии связи, сверхвысокочастотное излучение, фотоприемник.

Целью проекта является разработка конструкции кристалла высокочувствительного p-i-n ФП ближнего инфракрасного диапазона (850 нм) на подложке GaAs с низким уровнем темнового тока.

При выполнении проекта стояли следующие задачи:

1. Проведение моделирования и расчетов для подтверждения работоспособности фотоприемника
2. Создание технологической карты для изготовления фотоприемника
3. Разработка комплекта фотошаблонов для изготовления фотоприемника
4. Разработка методики испытаний опытных образцов
5. Апробация методики испытаний

Конструкция кристалла p-i-n ФП разрабатывалась с учетом дизайна эпитаксиальной гетероструктуры, выращенной в ООО «Коннектор Оптикс» на установке Riberg 49 методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs (таблица).

Конструкция гетероструктуры p-i-n ФП

Слой	Материал	Толщина, мкм	Легирование, см ⁻³
p-контакт	GaAs	0,03	+5e19
p-окно	Al _{0,22} Ga _{0,78} As	0,2	+1e19
p-градиент	Al _{0,05} GaAs to Al _{0,22} GaAs	0,02	+5e18
база	GaAs	2,0	–
n-градиент	Al _{0,05} GaAs to Al _{0,22} GaAs	0,02	–5e18
n-барьер	Al _{0,22} Ga _{0,78} As	0,2	–5e18
n-градиент	Al _{0,05} GaAs to Al _{0,22} GaAs	0,02	–5e18
n-контакт	GaAs	1	–5e18
Буфер	GaAs	0,2	
Подложка	GaAs	650	

Для построения зонной диаграммы гетероструктуры p-i-n ФП при нулевом смещении на его контактах и при обратном смещении производилось моделирование с применением программного пакета COMSOL Multiphysics 5.0. Моделирование проводилось с учетом приближения эффективной массы. Контакты являются омическими, n контакт p-i-n фотоприемника считался заземленным, на p-контакт подавалось напряжение равное 2 В, температура составляла 293 К. I-слой выполнен из GaAs и не легирован, его толщина 2 мкм, диаметр 50 мкм, он окружен слоями n- и p-типа, со степенями легирования $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ и $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ соответственно. Длина волны излучения, падающего на p-слой кристалла p-i-n ФП, составляла 850 нм, а мощность этого излучения была равной 0,15 Вт [1]. Моделирование показало, что значения зоны проводимости i-слоя находятся в пределе от 1,43 эВ до 0,19 эВ, а значения валентной зоны i-слоя от 0,01 эВ до -1,33 эВ, а ширина запрещенной зоны составляет 1,42 эВ, что позволяет поглощать излучение до 870 нм.

Для определения топологических размеров кристаллов быстродействующих p-i-n ФП необходимо учитывать электрофизические свойства эпитаксиальных гетероструктур и их конструкционное исполнение. Они оказывают существенное влияние на быстродействие и должны обеспечивать работу в широком диапазоне частот, а также, обладать малыми значениями токов утечки и обеспечивать высокую квантовую эффективность [2]. Были рассмотрены характеристики ФП в частотном диапазоне от 1 до 20 ГГц для обеспечения его надежной работы на частотах до 10 ГГц. Для эквивалентной схемы был рассчитан коэффициент отражения S_{11} от выхода при различных емкостях фотоприемника. Хорошим уровнем согласования – коэффициент отражение -10 дБ (рис. 1).

Из графика следует, что уровень согласования в -10 дБ при емкости p-n перехода C_j равной 0,11 пФ достигается при 19 ГГц.

Проведение теплового моделирования продемонстрировало, что наибольшая температура наблюдается в i- и p-слоях и имеет значение 330-334 К (рис. 2), а температура подложки составляет не более 325 К близ n-слоя.

Максимальная температура достигается в i-слое, выполненном из GaAs, и равна 334 К (61 °С), что свидетельствует о нагреве рабочей области на 41 К относительно нормальной температуры.

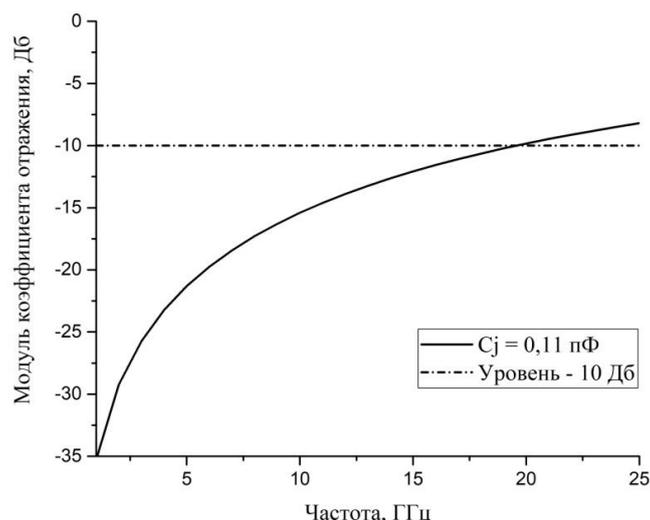


Рис. 1. Коэффициент отражения от согласованного кристалла p-i-n ФП

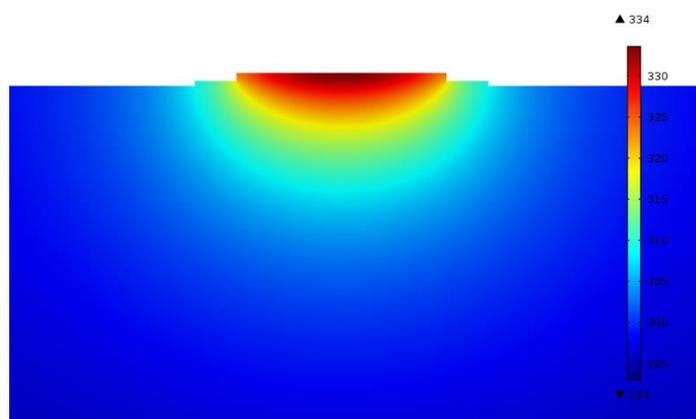


Рис. 2. Распределение температуры в главном сечении кристалла p-i-n ФП

Разработка топологии кристалла осуществлялась с применением САПР КОМПАС 3D, позволяющим осуществлять проверку совместимости слоев на отдельные топологические элементы конструкции кристалла с учетом топологических ограничений, накладываемые технологическими процессами изготовления. Рабочий комплект фотошаблонов для изготовления кристаллов p-i-n ФП в соответствии с технологическим маршрутом состоит из 6 шаблонов. Фотошаблоны изготавливаются из кварцевого стекла. Фотошаблоны для изготовления p-i-n ФП служат базой для разработки фотошаблонов резонансного p-i-n ФП с копланарной линией и контактами для крепления кристалла методом flip-chip. В гетероструктуру РФП добавлены чередующиеся слои $Al_{0,9}Ga_{0,1}As/Al_{0,12}Ga_{0,88}As$, выполненные в виде распределенного брэгговского отражателя, с коэффициентом отражения близким к 100% в диапазоне длин волн 840-860 нм [3], что позволяет увеличить фоточувствительность устройства.

Измерение вольт-амперной характеристики производилось в диапазоне напряжения от 0 до 2 В. Кристалл p-i-n ФП демонстрирует рабочее состояние при прямом смещении при токе до 10 мА (рис. 3). При исследовании было измерено 160 точек. Скорость измерения каждой точки составляла 10 мс. Экспоненциальное возрастание тока происходит при достижении значения напряжения равного 1,18 В, а

при напряжении 1,42 В достигает значения тока равное 10 мА, после чего значение тока не меняется [4-8].

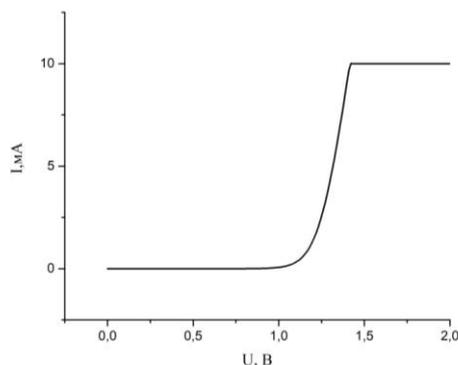


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика кристалла p-i-n ФП при токе равном 10 мА

Пробой исследуемого кристалла p-i-n ФП происходит при значении тока равном 36 мА и напряжении 1,88 В, после чего он выходит из строя. Экспоненциальное возрастание тока происходит при значении напряжения 1,18 В. При исследовании вольт-амперной характеристики кристалла p-i-n ФП была измерена 141 точка. Скорость измерения каждой точки составляла 10 мс.

Измерение темнового тока проводилось в диапазоне напряжения от 0 до -5 В с шагом -0,2 В. По достижении значения напряжения -5 В, темновой ток составляет -1,45 нА (рис. 4).

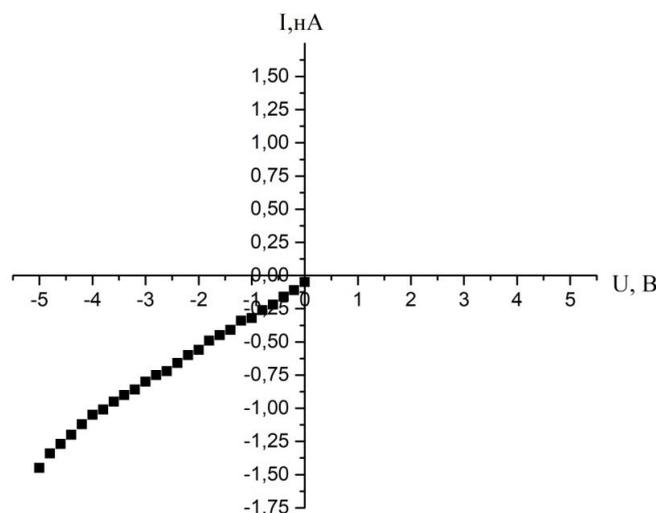


Рис. 4. Темновой ток кристалла p-i-n ФП

Расчет фоточувствительности осуществлялся с учетом электрической схемы используемой установки. Мощность источника оптического излучения «РУБИН 107» составляет 254 мВт. Максимальное показание тока на пикоамперметре составило 51 мкА. Фоточувствительность составляет 0,6 А/Вт.

Результатом проведенных моделирований и расчетов явилась разработка рабочего комплекта фотошаблонов для изготовления p-i-n ФП ближнего инфракрасного диапазона, определяющего конструкцию кристалла p-i-n ФП. Была разработана и

апробирована методика измерений вольт-амперных характеристик, темнового тока и фоточувствительности кристаллов р-і-п ФП. Для измерения характеристик был осуществлен монтаж кристалла на СВЧ плату и проведено его корпусирование. Выращенные с использованием разработанных фотошаблонов кристаллы р-і-п ФП подтвердили свою работоспособность, что позволяет использовать корпусированные кристаллы р-і-п ФП как готовую продукцию в ВОЛС с первым окном прозрачности.

Разработанные кристаллы, за счет своих эффективных электрофизических свойств, низкой стоимости изготовления и отсутствия импортных составляющих способны найти свое применение в медицине, телекоммуникациях, военно-промышленном комплексе, метрологии. *Работа выполнена при поддержке Университета ИТМО в рамках практико-ориентированной НИОКР №416036.*

Литература

1. Рочас С.С., Колодезный Е.С., Шарипо К.Д., Козырева О.А., Новиков И.И., Егоров А.Ю. Гетероструктура резонансного р-і-п фотоприемника спектрального диапазона 850 нм//Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: Тезисы докладов 19-й Всероссийской молодежной конференции. 2017. С. 82.
2. Рочас С.С., Шарипо К.Д., Колодезный Е.С., Козырева О.А., Егоров А.Ю. Разработка гетероструктуры резонансного Р-І-Н фотоприемника спектрального диапазона 840–860 НМ // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием (Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 г.). Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. 2017. С. 272-274.
3. Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Gladyshev A.G., Rochas S.S., Sharipo K.D., Karachinsky L.Y., Egorov A.Y., Bougrov V.E. Study of antireflection coatings for high-speed 1.3 - 1.55 μm InGaAs/InP PIN photodetector // Materials Physics and Mechanics. 2017, Vol. 32, No. 2, pp. 194-197.
4. Рочас С.С., Колодезный Е.С., Козырева О.А., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Воропаев К.О. Сверхвысокочастотный резонансный р-і-п фотоприемник для первого окна прозрачности волоконно-оптических линий связи//Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: Тезисы докладов 20-й Всероссийской молодежной конференции. 2018. С. 109.
5. Rochas S.S., Kolodeznyi E.S., Kozyreva O.A., Voropaev K.O., Sudas D.P., Novikov I.I., Egorov A.Y. A heterostructure for resonant-cavity GaAs p-i-n photodiode with 840-860 nm wavelength // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1236, No. 1, pp. 012071.
6. Babichev A. V. et al. 6-mW Single-Mode High-Speed 1550-nm Wafer-Fused VCSELs for DWDM Application // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2017. Т. 53. №. 6. С. 1-8.
7. Urick V. J., Williams K. J., McKinney J. D. Fundamentals of microwave photonics. – John Wiley & Sons. 2015. Т. 1. С. 351– 376.
8. Рочас С.С., Шарипо К.Д., Колодезный Е.С., Козырева О.А., Егоров А.Ю. Разработка гетероструктуры резонансного Р-І-Н фотоприемника спектрального диапазона 840–860 нм// Неделя науки СПбПУ Материалы научного форума с международным участием (Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 г.). Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. 2018. С. 272–274.



Царёв Дмитрий Владимирович
Факультет Лазерной фотоники и оптоэлектроники
E-mail: dmitriy_93@mail.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КВАНТОВОГО СЕНСОРА С РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ, ПРЕВЫШАЮЩЕЙ ПРЕДЕЛ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Д.В. Царёв

Научный руководитель – д. ф.-м. н. А.П. Алоджанц

Работа выполнена в рамках темы НИР №19-52-52012 МНТ_а «Машинное обучение для гибридной квантовой обработки информации и метрологии»

Аннотация

В работе предложен способ формирования максимально пространственно-запутанных $N00N$ -состояний и их использование в квантовой метрологии и квантовой сенсорике для измерений малых фазовых сдвигов и пространственных смещений. Разработана квантовая модель светлых солитонов Бозе-Эйнштейновского конденсата (БЭК) атомов, помещенного в W -потенциал, изучены условия формирования $N00N$ -состояния на его основе. Получена оценка точности прецизионной интерферометрии линейного фазового сдвига, кинематических параметров солитонов – расстояния между центрами масс и относительного импульса, а также u^2 -параметра, связанного с длиной рассеяния частиц. Показано достижение предела Гейзенберга при линейной интерферометрии и преодоление данного предела методами нелинейной метрологии.

Ключевые слова

Метрология, сенсорика, интерферометры, Бозе-конденсат, солитон, квантовая запутанность, предел Гейзенберга.

Объектом настоящего исследования являются запутанные состояния светлых материально-волновых солитонов конденсата Бозе-Эйнштейна (БЭК), помещенного в W -потенциал. *Целью данной работы* является разработка квантовой модели формирования максимально пространственно-запутанных $N00N$ -состояний таких солитонов для применения в квантовой метрологии и сенсорике. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- Разработать квантовую модель формирования запутанных солитонных состояний в БЭК;
- Изучить условия формирования $N00N$ -состояния солитонов;
- Оценить точность прецизионной интерферометрии с использованием полученных состояний;

Введение

В последние десятилетия прикладные квантовые технологии все больше привлекают внимание в мире как исследователей, так и предпринимателей, нацеленных на высокотехнологичный бизнес. Применение подходов квантовой физики, при

создании квантовых симуляторов, систем квантового искусственного интеллекта, квантовой криптографии и т.д. позволяет значительно повысить потенциал современных технологий, например, ускоряя и удешевляя вычислительные процессы, удешевляя производство, повышая безопасность коммуникаций и качество их функционирования.

Особое место в современной квантовой науке занимает квантовая метрология – наука об измерении физических величин с максимально допустимой точностью, определяемой квантовыми шумами. Основным инструментом квантовой метрологии является прецизионная интерферометрия, т.е. измерение фазового сдвига в плечах интерферометров различных конфигураций. На базе интерферометров созданы многочисленные измерительные устройства, такие как дальнометры, гравитометры, гироскопы, датчики малых физических смещений, дефектоскопы, сверхчувствительные термометры, устройства для измерения концентрации веществ и многие другие. Повышение точности интерферометрии в значительной степени повлияет на рынок существующих микро- и нано-устройств, используемых в метрологических целях, в навигации, а также в качестве сенсоров в биофотонике, медицине и т.д.

Точность измерения инструментов классической метрологии, например, интерферометров с когерентным или фоковским состоянием на входе, ограничена так называемым Стандартным Квантовым Пределом (СКП) $\propto N^{-1/2}$, где N – число частиц, участвующих в измерении. Использование неклассических сжатых и/или запутанных состояний позволяет преодолеть СКП в двумодовых системах, например, интерферометрах, гироскопах, литографах и др., см. например [1]. При этом точность измерения фазового сдвига, зависящего N линейно, ограничено пределом Гейзенберга $\propto N^{-1}$, который также может быть преодолен с помощью методов нелинейной квантовой метрологии.

Особое место в квантовой метрологии занимает т.н. $N00N$ -состояние. Это максимально пространственно-запутанное N -частичное состояние, представляет собой суперпозицию следующего вида:

$$|N00N\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|N, 0\rangle + e^{i\theta}|0, N\rangle), \quad (1)$$

где $|n, m\rangle \equiv |n\rangle_1|m\rangle_2$ – двумодовое состояние с n частиц в моде a и m частиц в моде b . Было показано, что $N00N$ -состояние (1) позволяет достичь предел Гейзенберга при линейной интерферометрии в любом двумодовом интерферометре [1]. Однако, получение устойчивых мезоскопических $N00N$ -состояний остается нетривиальной задачей, как для теории, так и для эксперимента. На данный момент экспериментально были получены $N00N$ -состояния лишь с несколькими частицами [2].

Возможной платформой для получения мезоскопических $N00N$ -состояний являются материально-волновые солитоны БЭК. т.е. конденсат Бозе-Эйнштейна – это особое состояние вещества, в котором проявляются такие макроскопические квантовые эффекты, как сверхтекучесть, квантовые вихри и др. С точки зрения квантовой физики, БЭК представляет собой ансамбль частиц, бозонов, находящихся в нижнем энергетическом состоянии при сверхнизкой температуре. В таком состоянии длина волны де Бройля частиц оказывается больше среднего межчастичного расстояния, и отдельные частицы оказываются неразличимы. Таким образом, Бозе-конденсат следует рассматривать как единый макроскопический квантовый объект, описываемый одной волновой функцией.

Квантовая модель запутанных состояний материально-волновых солитонов БЭК

Рассмотрим два идеальных БЭК, суммарно состоящие из N частиц, помещенные в W -потенциал и слабо-связанные (туннельно) между собой [3, 4], см. рис. 1. Полный гамильтониан такой системы может быть записан в форме вторичного квантования, как

$$H = H_1 + H_2 + H_{int}, \quad (2a)$$

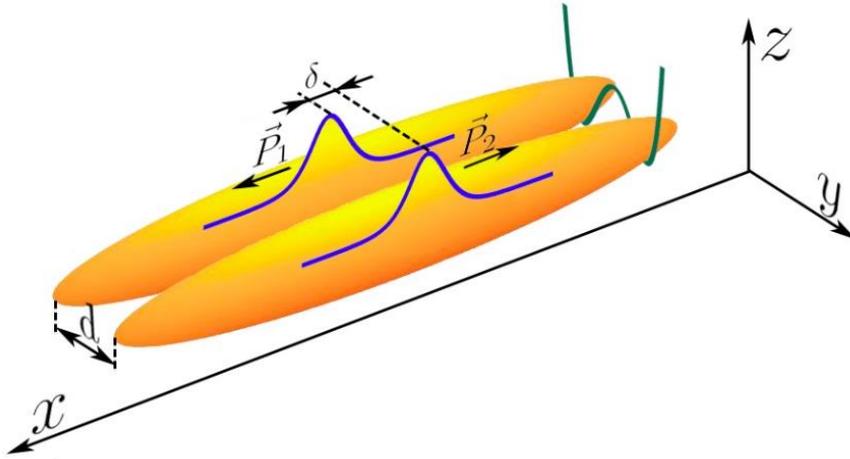


Рис. 1. солитоны в БЭК, заключенном в W -потенциале, состоящем из двух сильно асимметричных сигарообразных ловушек [4]. Расстояние d влияет на перекрытие волновых функций и определяет параметр κ

где H_j – Гамильтониан уединенного конденсата в j -й ловушке, тогда как H_{int} – Гамильтониан их взаимодействия:

$$H_j = \int_{-\infty}^{\infty} a_j^\dagger(x) \left(-\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{u}{2} a_j^\dagger(x) a_j(x) \right) a_j(x) dx; \quad (26)$$

$$H_{int} = \kappa \int_{-\infty}^{\infty} (a_1^\dagger(x) a_2(x) + a_2^\dagger(x) a_1(x)) dx, \quad (2b)$$

где u характеризует двухчастичное взаимодействие атомов в конденсате; κ – скорость туннельного обмена. Далее, полагаем, что основное состояние бозонной системы является произведением N одночастичных состояний, что справедливо для большого числа частиц, запишем вектор основного состояния, в котором пребывает система, изображенная на рис. 1:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{N!}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (\Psi_1(x) a_1^\dagger(x) + \Psi_2(x) a_2^\dagger(x)) dx \right]^N |0\rangle, \quad (3)$$

где $|0\rangle = |0\rangle_a |0\rangle_b$ – двумодовое вакуумное состояние; $\Psi_j(x)$ – волновые функции, удовлетворяющие уравнениям Гросса-Питаевского с Гамильтонианом (3) в отсутствие туннелирования, $\kappa = 0$. Для атомных сред с отрицательной длиной рассеяния, например конденсатов лития ${}^7\text{Li}$ они допускают решения в форме светлых солитонов:

$$\Psi_j = \frac{N_j}{2} \sqrt{\frac{u}{N}} \operatorname{sech} \left[\frac{N_j u}{2} (x - X_j) \right] e^{i\theta_j + iP_j(x - X_j)}, \quad (4)$$

где N_j и θ_j – населенность и коллективная фаза j -го конденсата, X_j и P_j – координата центра масс солитона и его одномерный импульс, соответственно. Используя инвариантность Галилея, можно выбрать систему отсчета, в которой $P_1 = -P_2$. Следуя методу Рэлея-Ритца, полагаем, что решение (4) сохраняет свою форму (гиперболического секанса) и при наличии небольшого туннельного взаимодействия, $\kappa > 0$, описанные выше четыре параметра становятся функциями времени.

Вместо указанных четырех пар параметров удобнее использовать их комбинации, являющиеся минимально необходимым набором параметров для описания рассматриваемой системы: $\theta = \theta_2 - \theta_1$, $z = (N_2 - N_1)/N$ – разности фаз и населенностей солитонов; $\delta = X_2 - X_1$ – расстояние между центрами масс солитонов и $P = P_2 - P_1$ – импульс их относительного движения. С помощью вариационного подхода квантовой теории поля на основе Гамильтониана (2) и состояния (3) были получены четыре уравнения динамики для данных параметров. Для краткости, здесь будут приведены эти уравнения лишь в пределе максимальной разности населенностей $z^2 \approx 1$:

$$\dot{\theta} = (\Lambda + A \cos[\theta])z; \quad (5a)$$

$$\dot{z} = 0; \quad (5б)$$

$$\dot{\delta} = P/2\kappa; \quad (5в)$$

$$\dot{P} = 0. \quad (5г)$$

Точками в (5) обозначены производные по безразмерному времени $\tau = 2\kappa t$. Также в (5) вводится ключевой (материальный) параметр среды, определяющий динамику солитонов $\Lambda = u^2 N^2 / 16\kappa$; $A = \frac{\pi}{2} \operatorname{sech} \left[\frac{\pi P}{4\sqrt{\kappa\Lambda}} \right] \cos \left[\frac{P\delta_0}{2} \right]$; $\delta_0 = \delta(0)$ – расстояние между «центрами масс» солитонов в начальный момент времени. С уравнениями в общем случае, а также с подробными выкладками можно ознакомиться в [4]. Из (5) видно, что в данном пределе солитоны движутся с постоянной скоростью ($P = \text{const}$), а уравнение для фазы (5а) в данном пределе имеет стационарное решение ($\dot{\theta} = 0$):

$$\theta_0 = \arccos(-\Lambda/A). \quad (8)$$

Данный предел $z^2 = 1$ примечателен тем, что разность населенностей определена с точностью до знака. Следовательно, необходимо рассматривать одновременное существование в среде двух решений с $z = -1$ и с $z = +1$, т.е., в квантовом случае – суперпозицию состояния, при котором все N частиц находятся в первой ловушке, и состояния, при котором все частицы есть в правой ловушке. Это и есть $N00N$ -состояние (1):

$$|N00N\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\Psi_1\rangle + e^{iN\theta_0} |\Psi_2\rangle), \quad (9a)$$

где

$$|\Psi_{1,2}\rangle = \frac{1}{\sqrt{N!}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (\Phi_{1,2}(x) a_{1,2}^\dagger(x) e^{\mp iPx}) dx \right]^N |0\rangle; \quad (9б)$$

$$\phi_j = \frac{\sqrt{Nu}}{4} \operatorname{sech} \left[\frac{Nu}{4} x \right]. \quad (9в)$$

Условие (8) накладывает ограничение на параметр Λ , при котором возможно формирование состояния (9): $0 < \Lambda < |A|$. В пределе неподвижных солитонов, $P \rightarrow 0$, это условие сводится к $0 < \Lambda < \pi/2$.

Прецизионная квантовая интерферометрия

На рис. 2 представлен интерферометр Маха-Цендера, использующий полученное запутанное состояние в качестве входного и позволяющий преодолеть СКП и предел Гейзенберга в рамках нелинейной квантовой метрологии. Измеряемым параметром является фазовый сдвиг $\phi = \phi_2 - \phi_1$. Стоит отметить, что система уравнений (5) не описывает одновременное движение солитонов вдоль оси x , только их движение друг относительно друга. В качестве измеряемого оператора можно использовать оператор четности $\hat{X} \equiv (-1)^{a_2^\dagger a_2}$ [3], либо проекционный оператор $\hat{X} \equiv |\Psi_1\rangle\langle\Psi_2| + |\Psi_2\rangle\langle\Psi_1|$ [4].

Оба оператора имеют одинаковые средние значения и дисперсии, а также дают одинаковую точность измерений:

$$\langle \hat{X} \rangle = \cos[N(\phi + \theta_0)]; \quad \langle (\Delta X)^2 \rangle = \sin^2[N(\phi + \theta_0)]; \quad (10)$$

Согласно теории оценок [5], чувствительность при измерении некоторого параметра χ для схемы, изображенной на рис. 2, определяется как

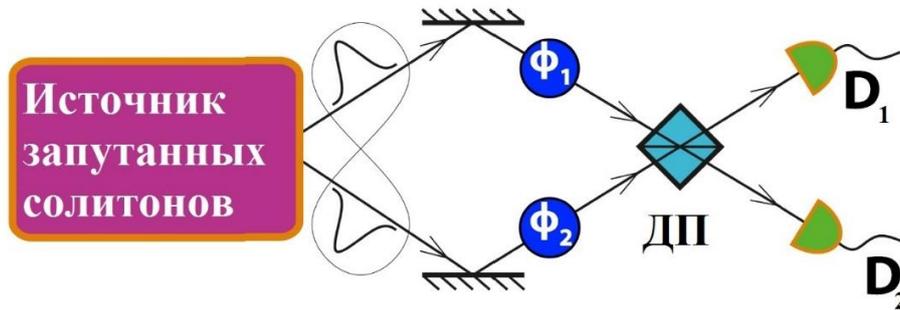


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента на основе интерферометра Маха-Цендера.
 ϕ_j – набег фазы в j -м плече; ДП – делитель пучков; D_j – детекторы j -й моды [3]

$$\langle (\Delta \chi)^2 \rangle = \frac{\langle (\Delta X)^2 \rangle}{\left| \frac{\partial \langle \hat{X} \rangle}{\partial \chi} \right|} = \left| \frac{\partial \theta}{\partial \chi} \right|^{-1}, \quad (11)$$

где $\theta = N\theta_0 + \phi$, что с учетом (10) дает значение погрешности измерения линейного фазового сдвига $\Delta \phi = N^{-1}$, т.е. достигает предел Гейзенберга. Кроме ϕ также могут быть измерены другие параметры, формирующие θ_0 , см. (8), при этом необходимо обеспечить $\phi = 0$. Так, при измерении начального расстояния между солитонами δ_0 и импульса P (в отдельных экспериментах) обеспечивается точность

$$\Delta \delta_0 = \frac{32\kappa}{N^3 u^2 P} \left| \frac{\sqrt{A^2 - \Lambda^2}}{\tan \left[\frac{P\delta_0}{2} \right]} \right|; \quad \Delta P = \frac{32\kappa}{N^3 u^2 \delta_0} \left| \frac{\sqrt{A^2 - \Lambda^2}}{\frac{2\pi}{uN\delta_0} \tanh \left[\frac{\pi P}{4\sqrt{\kappa\Lambda}} \right] + \tan \left[\frac{P\delta_0}{2} \right]} \right|, \quad (12)$$

т.е. точность $\propto N^{-3}$. С такой же точностью может быть измерен u^2 -параметр:

$$\Delta u^2 = \frac{16\kappa}{N^3} \left| \frac{\sqrt{A^2 - \Lambda^2}}{1 - \frac{1}{2} \frac{\pi P}{uN} \tanh \left[\frac{\pi P}{4\sqrt{\kappa\Lambda}} \right]} \right|. \quad (13)$$

Заключение

Исследование новых способов формирования многочастичных неклассических состояний, способных повысить точность квантовой интерферометрии, крайне важно, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Было показано, что слабо-связанные (туннельно) солитоны БЭК представляют удобную платформу для формирования максимально запутанных $N00N$ -состояний, позволяющих преодолеть СКП, достичь предел Гейзенберга в рамках линейной метрологии и преодолеть этот предел методами нелинейной квантовой метрологии. Более подробно с полученными результатами можно ознакомиться в [3-5].

Литература

1. Kok P., Braunstein S.L., Dowling J.P. Quantum lithography, entanglement and Heisenberg-limited parameter estimation // Journal of Optics B. 2004. Т. 6. №. 8. С. S811.
2. Lebugle M., Gräfe M., Heilmann R. и др. Experimental observation of N00N state Bloch oscillations // Nature communications. 2015. Т. 6. №. 1. С. 1-7.
3. Tsarev D.V., Arakelyan S.M., Chuang Y., Lee R., Alodjants A.P. Quantum metrology beyond Heisenberg limit with entangled matter wave solitons // Optics express. 2018. Т. 26. №. 15. С. 19583-19595.
4. Tsarev D.V., Ngo T.V., Ray-Kuang Lee, Alodjants A.P. Nonlinear quantum metrology with moving matter-wave solitons // New Journal of Physics. 2019. Т. 21. №. 8. С. 083041.
5. Helstrom C.W. Quantum detection and estimation theory. Academic press, 1976.



Шамова Александра Андреевна
Факультет Лазерной фотоники и оптоэлектроники
E-mail: alex.shamova94@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ОРТОПЕДИИ И ДЕРМАТОЛОГИИ

А.А. Шамова

Научный руководитель – профессор Е.Б. Яковлев

Аннотация

В работе представлена аналитическая модель остывания поверхности биологической ткани после воздействия серии коротких и ультракоротких лазерных импульсов. Использование модели может значительно упростить поиск оптимальных режимов лазерной обработки, необходимых для проведения эффективных и безопасных хирургических операций на биологических тканях различной структуры. Экспериментально подтверждена возможность разрушения красителя, расположенного на определённой глубине в коже, фемтосекундными лазерными импульсами без её повреждения.

Ключевые слова

Ультракороткие лазерные импульсы, костная ткань, свиная кожа, накопленное тепло, карбонизация.

В настоящее время наиболее динамично развивающимися направлениями современной лазерной медицины являются лазерная хирургия, стоматология и дерматология.

Операции в дерматологии по удалению различных кожных новообразований (невусов, папиллом, кератом, меланом и т.д.), а также в ортопедической хирургии, связанные с абляцией твёрдых биологических тканей, требуют высокой точности исполнения. Поэтому одной из важных задач современной медицины является разработка лазерных систем для проведения хирургических операций на биотканях различной структуры, которые позволят достигать требуемый результат при минимальном повреждении областей, окружающих зону обработки. К настоящему времени показана перспективность использования для этих целей лазеров с ультракороткой длительностью импульсов [1].

Для увеличения эффективности обработки как мягких, так и твёрдых биотканей используются режимы многоимпульсного воздействия. Недостатком данного подхода является то, что необходимый результат хирургического вмешательства достигается в узком диапазоне параметров лазерного излучения, выход за пределы которого способен привести к накопительному нагреву, что может стать причиной необратимых повреждений здоровых тканей, расположенных вокруг зоны обработки. Кроме того, оптические и теплофизические параметры биоткани могут существенно изменяться при воздействии на неё лазерного излучения вследствие различных физико-химических процессов [2]. Поэтому во время проведения операций лазерное воздействие на биоткань становится трудно контролировать. В этом случае важно определить оптимальные

параметры лазера, которые обеспечат селективный нагрев биоткани без побочных эффектов. При выработке методик и критериев для оптимизации параметров лазерных систем значительную роль играет физико-математическое моделирование процессов, протекающих в биоткани при лазерном облучении.

К настоящему времени проведено большое количество экспериментальных исследований по лазерной обработке различных биотканей в зависимости от плотности энергии лазерного излучения, длины волны излучения, длительности импульсов, частоты их следования [1-3]. Однако до сих пор отсутствуют достоверные и адекватные физико-математические модели, позволяющие анализировать процесс нагрева твёрдых биотканей при многоимпульсном воздействии ультракоротких лазерных импульсов, что приводит к ограничению использования лазерной технологии в ортопедии. Кроме того, отсутствуют общепринятые алгоритмы поиска оптимальных режимов удаления кожных новообразований и татуировок с помощью ультракоротких лазерных импульсов, что вызывает необходимость проведения дальнейших исследований.

Цель проекта – исследовать процесс накопления тепла в биологических тканях при многоимпульсной обработке ультракороткими лазерными импульсами на примере костной ткани в условиях изменения её оптических свойств и свиной кожи с нанесённым на сетчатый слой дермы красителем и разработать методику анализа лазерного нагрева биологических тканей при проведении хирургических операций.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- разработать аналитическую модель, качественно описывающую пространственное распределение накопленного тепла на поверхности биологической ткани при многоимпульсном облучении ультракороткими лазерными импульсами;
- проанализировать механизм и кинетику изменения оптических свойств костной ткани при многоимпульсном фемтосекундном лазерном облучении;
- сравнить полученные результаты моделирования с данными экспериментальных исследований;
- экспериментально исследовать возможность удаления нанесённого на сетчатый слой дермы красителя без повреждения кожи при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов.

Чтобы оценить накопление тепла при обработке биоткани серией ультракоротких лазерных импульсов, необходимо рассмотреть стадию последействия. В течение фемтосекундного лазерного импульса происходит развитие только процессов фотовозбуждения. После его окончания начинается стадия последействия, включающая в себя нагрев биоткани до максимальной температуры и её остывание. Стадия остывания поверхности биоткани является более продолжительной, чем стадии фотовозбуждения и нагрева. В этом случае время теплового последействия фемтосекундного лазерного импульса определяется теплофизическими свойствами ткани и соизмеримо со временем воздействия наносекундного лазерного импульса [4]. Следовательно, можно использовать одинаковый подход для качественного анализа остаточного нагрева биоткани при её облучении серией наносекундных и фемтосекундных лазерных импульсов. В этом случае при рассмотрении процесса остывания биоткани после воздействия ультракоротким импульсом можно использовать теплопроводностное приближение.

В биотканях время перехода поглощённой энергии лазерного излучения в тепловую (время нагрева) t_r составляет $\sim 10^{-12}$ с [5]. Кроме того, биоткани имеют малую температуропроводность [2]. Поэтому за счёт теплопроводности прогревается область, размер которой значительно меньше радиуса зоны облучения ($\sqrt{at_r} \ll r_0$) как для наносекундных, так и для фемтосекундных лазерных импульсов. В рассматриваемой в работе ближней ИК области спектра для большинства биотканей характерны малые

коэффициенты поглощения ($1/\alpha \gg \sqrt{at_r}$) [2]. Поэтому можно использовать частный случай решения одномерной модели нагрева полубесконечного твёрдого тела. Тогда можно считать, что распределение температуры в облучённой области к моменту начала остывания поверхности биоткани повторяет распределение поглощённой энергии лазерного излучения (гауссово распределение), которое сохраняется на любой глубине при экспоненциальном спаде с глубиной. Начальное распределение температуры на поверхности биоткани

$$T(r) = T_{\max} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (1)$$

где T_{\max} – максимальная температура нагрева поверхности биоткани к моменту начала остывания, r – радиальное расстояние от центра лазерного пятна, r_0 – радиус пятна лазерного излучения.

При разработке модели используется предположение о том, что вся поглощённая энергия тратится на нагревание, а остывание поверхности начинается с момента достижения максимальной температуры нагрева, рассчитываемой по формуле (2)

$$T_{\max} = \frac{\alpha AE}{C}, \quad (2)$$

где E – плотность энергии лазерного излучения, α , A , C – эффективный коэффициент поглощения, поглощательная способность и объёмная теплоёмкость биоткани, соответственно.

В работе было получено решение уравнения теплопроводности, описывающего остывание нагретой области, с заданным начальным распределением температуры. Выражение, позволяющее оценить остаточную температуру поверхности биоткани на расстоянии r от оси лазерного пучка без учёта величины начальной (комнатной) температуры при воздействии N импульсов к моменту прихода $N+1$ импульса при частоте их следования f , имеет вид

$$\Delta T\left(t = \frac{N}{f}, r\right) = T_{\max} \sum_{i=1}^N \frac{r_0^2}{\left(r_0^2 + 4ai / f\right)} \exp\left(-\frac{r^2}{\left(r_0^2 + 4ai / f\right)}\right), \quad (3)$$

где a – температуропроводность биоткани. Так как остаточная температура не зависит от длительности импульса, выражение (3) может быть применено для оценки накопленного на поверхности биоткани тепла, как для коротких, так и для ультракоротких импульсов.

Справедливость предложенной модели накопления тепла была проверена на модельном биообъекте. На начальном этапе исследований для упрощения анализа процессов накопления тепла в биоткани в качестве объекта исследования выбрана сухая оленья кость, имеющая толщину $4 \pm 0,2$ мм. Модельный объект рассматривается как квазиоднородная среда со средними значениями оптических и теплофизических параметров [6-10]. В работе был проведён расчёт радиальных распределений остаточной температуры поверхности биоткани согласно выражению (3) для разных длительностей импульсов и различных частот их следования. Результаты расчётов были сопоставлены с данными экспериментальных исследований, выполненных автором проекта по облучению сухой кости наносекундными лазерными импульсами, а также с экспериментальными данными по фемтосекундной лазерной обработке сухой кости, представленными в работе [1].

В эксперименте использовались установка «Минимаркер-2» (ООО «Лазерный Центр», Россия) на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны излучения 1.07 мкм, длительностью импульсов 50 нс и частотой следования импульсов до 100 кГц и микроскоп «Axio Imager.A1m» (Carl Zeiss, Германия) с CCD-камерой «AxioCam ICc3» (Carl Zeiss, Германия). Облучение образца проводилось в фокальной плоскости длиннофокусного объектива с радиусом пятна в области перетяжки 30 ± 3 мкм в течение 10 секунд при постоянном значении плотности энергии излучения $3,5$ Дж/см² (погрешность менее 10 %) при частотах следования импульсов 1–50 кГц. При моделировании использовались следующие значения параметров костной ткани [1, 2]: $A=0,22-1$; $\alpha=10-20$ 1/см; $C=1,4$ Дж/см³·К; $a=0,038$ см²/с.

В работе [1] приведены экспериментальные данные по фемтосекундной лазерной обработке сухой говяжьей кости. В экспериментах [1] излучение фемтосекундного лазера серии Tangerine (Amplitude Systemes, Франция) с длиной волны излучения 1,03 мкм, длительностью импульсов 320 фс фокусировалось в пятно диаметром 12,6 мкм. Плотность энергии лазерного излучения составляла 40 Дж/см². Облучение образца проводилось в течение 10 секунд при частотах следования импульсов 1–22 кГц.

Получено хорошее согласие экспериментальных данных с результатами моделирования при скачкообразном возрастании величин оптических параметров сухой костной ткани (коэффициента поглощения и поглощательной способности) при многоимпульсном наносекундном и фемтосекундном лазерном нагреве до температуры карбонизации.

В настоящее время возможность применения фемтосекундных лазеров для удаления патологических кожных новообразований и татуировок мало изучена, что стимулирует проведение исследований в этом направлении.

В качестве модельного объекта выбран слой кожи толщиной $1,9 \pm 0,2$ мм, взятый с брюшной части свиньи. До эксперимента образец хранился в физиологическом растворе. Волосяной покров и подкожный слой жировой клетчатки были удалены перед экспериментом. На сетчатый слой дермы был нанесён черный краситель «True Black» (World Famous Tattoo Ink, США), создающий на тыльной стороне образца неоднородность, которой на практике могут быть, например, кожное новообразование или татуировка.

Облучение образца проводилось с помощью лазерной системы, состоящей из титан-сапфирового фемтосекундного лазера TiF-100-F4 («Авеста-Проект», Россия) и регенеративного усилителя RAP1500 («Авеста-Проект», Россия) с центральной длиной волны излучения 800 нм, FWHM длительностью импульса ≈ 100 фс, частотой их следования 10 Гц, максимальной энергией в импульсе 1,2 мДж (TEM₀₀ мода).

В ходе эксперимента было установлено, что при диаметре пятна излучения лазера на лицевой поверхности образца, равном 530 мкм, плотности энергии излучения $0,4$ Дж/см², числе импульсов 600 и частоте их следования 10 Гц происходит разрушение красителя без повреждения свиной кожи.

В результате проделанной работы была разработана аналитическая модель остывания поверхности биоткани после многоимпульсного облучения короткими и ультракороткими лазерными импульсами. В медицине при определении оптимальных параметров лазеров для различных операций необходимо учитывать эффекты, происходящие не только на поверхности биоткани, но и в объёме. Дальнейшее развитие предложенной модели в этом направлении позволит значительно упростить подбор допустимых режимов лазерного воздействия, снизить вероятность или полностью исключить возникновение нежелательных побочных эффектов, а также расширить область безопасного применения фемтосекундных лазерных систем в медицине.

Проведён анализ процесса карбонизации сухой костной ткани при воздействии на неё наносекундных и фемтосекундных лазерных импульсов. Оценён вклад в накопление тепла на поверхности твердой биоткани изменения её оптических свойств. В реальных условиях в результате уменьшения количества воды в биоткани при лазерном облучении могут изменяться не только её оптические, но и теплофизические параметры. Поэтому представляет интерес исследовать влияние воды на процесс накопления тепла в биоткани при многоимпульсном воздействии ультракоротких лазерных импульсов.

Экспериментально подтверждена возможность разрушения красителя, расположенного на определённой глубине в коже, фемтосекундными лазерными импульсами без её повреждения при плотности энергии излучения $0,4 \text{ Дж/см}^2$, числе импульсов 600 и частоте их следования 10 Гц. Полученный результат подтверждает потенциал новой технологии для минимизации нежелательного теплового повреждения биоткани при удалении кожных новообразований и татуировок с помощью ультракоротких лазерных импульсов.

Литература

1. Shamova A., Shandybina G., Yakovlev E. Modelling of the heat accumulation process during short and ultrashort pulsed laser irradiation of bone tissue // *Biomedical Optics Express*. 2019. Vol. 10. №. 6. P. 3030–3040.
2. Шамова А.А. Аналитическая модель остывания поверхности биологической ткани после воздействия ультракоротких лазерных импульсов // *Сборник трудов VIII Конгресса молодых ученых*. СПб.: Университет ИТМО. 2019. Т. 2. С. 369–374.
3. Шамова А.А., Беликов А.В., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б. Экспериментальное моделирование физического процесса лазерного удаления татуировки // *Квантовая электроника*. 2019. Т. 49. № 1. С. 52–58.
4. Шамова А.А., Беликов А.В., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б. Нано- и фемтосекундное высокочастотное многоимпульсное воздействие лазерного излучения на обезвоженную костную ткань, роль накопленного тепла и модель остывания // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48. № 8. С. 755–760.
5. Шамова А.А., Шандыбина Г.Д., Яковлев Е.Б. Модель остывания и эффект накопления тепла при нано- и фемтосекундном лазерном воздействии на обезвоженную костную ткань // *Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018»*. Санкт-Петербург. 15–19 октября 2018. СПб.: Университет ИТМО. 2018. С. 450–451.
6. Gill R.K., Smith Z.J., Lee C., Wachsmann-Hogiu S. The effects of laser repetition rate on femtosecond laser ablation of dry bone: a thermal and LIBS study // *Journal of Biophotonics*. 2016. Vol. 9. № 1–2. P. 171–180.
7. Sobol E.N. Phase transformations and ablation in laser-treated solids. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1995. 332 p.
8. Watanabe S., Anderson R.R., Brorson S., Dalickas G., Fujimoto J.G., Flotte T.J. Comparative studies of femtosecond to microsecond laser pulses on selective pigmented cell injury in skin // *Photochemistry and Photobiology*. 1991. Vol. 53. № 6. P. 752–762.
9. Вейко В.П., Шахно Е.А., Яковлев Е.Б. Эффективное время термического воздействия сверхкоротких лазерных импульсов на диэлектрики // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44. №. 4. С. 322–324.
10. Franjic K., Cowan M.L., Kraemer D., Miller R.D. Laser selective cutting of biological tissues by impulsive heat deposition through ultrafast vibrational excitations // *Optics Express*. 2009. Vol. 17. №25. P. 22937–22959.

СОДЕРЖАНИЕ

Беляева А.С. РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ БЛЕСКА МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ.....	5
Бобе А.С. РАЗРАБОТКА ИК ЭНДОСКОПА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ТКАНЕЙ ПРИ МАЛОИНВАЗИВНОЙ ЛАПАРОСКОПИИ.....	9
Быкадоров М.В. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В МАССИВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПОСРЕДСТВОМ ДВУСТОРОННЕГО АМПЛИТУДНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ.....	14
Воробьева А.А. EVENT-МАРКЕТИНГ КАК СРЕДСТВО ПОПУЛЯРИЗАЦИИ НАУКИ В ОБЩЕСТВЕ.....	20
Гайош А.И. МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЯ ЦЕЛЕВОГО АЛГОРИТМА НА УЗЛЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....	26
Герасименко В.С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО СВЕТОДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КВАНТОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	31
Залеская Ю.К. СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАКЕТА ВНУТРЕННЕГО БЛОКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ.....	36
Карманова Н.А. РАЗРАБОТКА МЕР ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА ЗАКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «ИНСТИТУТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ».....	43
Кутьянова Л.Р. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В СТУПЕНЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ.....	49
Смирнова А.Ю. УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ – ТАРГЕТИРОВАНИЕ В БЕСКОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ, ЗАДАВАЕМОМ НЕПОЛНОТОЙ ЗНАНИЙ О ПРОЦЕССЕ.....	54
Старкова П.С. ДЕТЕКЦИЯ ДВУХЦЕПОЧЕЧНЫХ ШТАММОВ MYCOBACTERIUM TUBERCULOSIS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДНК-НАНОМАШИНЫ.....	58
Тхоржевский И.Л. РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИЛИЦИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	64

Чупров С.С. ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОЕЗДА ПЕРЕКРЁСТКОВ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ В РАМКАХ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	68
Аксенова О.И. РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУДЕРА С ДИНАМИЧЕСКИМ ФОРМУЮЩИМ УЗЛОМ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО И ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.....	76
Василенок А.В. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ WBC УСТАНОВОК.....	81
Жигновская Д.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ВИНТОВОГО ОДНОРОТОРНОГО КОМПРЕССОРА.....	88
Квицинский А.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СОСТОЯНИЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ.....	94
Колодный С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СПИНОВЫХ ВОЛН В ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ Au-YIG С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК.....	100
Мазур Я.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОВЕРХНОСТЯМИ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ ФОРМИРУЮЩЕГО СЛОЖНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТА.....	106
Нехороших А.Н. КОНЕЧНО-ВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА И КОМПЕНСАЦИЯ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ.....	111
Николаев А.С. РАЗРАБОТКА ОТРАСЛЕВОГО СТАНДАРТА ПРОВЕДЕНИЯ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТРОЕНИЯ ПАТЕНТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА.....	116
Орехова М.К. РАЗРАБОТКА СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОЛЯ.....	120
Рочас С.С. РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ФОТОПРИЕМНИКА БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПЕРВОГО ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ КВАРЦЕВОГО ОПТОВОЛОКНА.....	126
Царёв Д.В. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КВАНТОВОГО СЕНСОРА С РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ, ПРЕВЫШАЮЩЕЙ ПРЕДЕЛ ГЕЙЗЕНБЕРГА.....	131
Шамова А.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ОРТОПЕДИИ И ДЕРМАТОЛОГИИ.....	137

**СБОРНИК РАБОТ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ
УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА**

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 28.04.2020

Заказ № 4359 от 28.04.2020

Тираж 50 экз.

Печатается в авторской редакции