

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

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2018

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 254 с.

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



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, 2018

Авторы, 2018



Проректор по научной работе Университета ИТМО В.О. Никифоров с победителями конкурса грантов из Университета ИТМО на церемонии награждения

В настоящее время Университет ИТМО располагает научными кадрами и современной научно-исследовательской и инновационной инфраструктурой, обеспечивающей проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Молодые ученые активно участвуют в научно-исследовательской деятельности университета.

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. В нем на протяжении семнадцати лет участвуют аспиранты Университета ИТМО.

Наш университет занимает второе место среди вузов Санкт-Петербурга по количеству поданных и выигранных заявок. В 2017 году аспирантами Университета ИТМО было подано 284 заявки, из них выиграно 75.

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

В настоящий сборник вошли работы аспирантов – победителей конкурса грантов 2017 года для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Представленные работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых аспирантами университета под руководством ведущих ученых вуза.

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



Аксенова Ольга Игоревна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра процессов и аппаратов пищевых производств
E-mail: oks280491@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСТАВЛЕНИЯ РЕЦЕПТУР КОРМОВ ДЛЯ НЕПРОДУКТИВНЫХ ЖИВОТНЫХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ ЛОГИЧЕСКИХ МНОЖЕСТВ

О.И. Аксенова

Научный руководитель – профессор Г.В. Алексеев

Цель исследования – разработка математической модели составления линейки сбалансированных рецептур кормов для непродуктивных животных.

В процессе выполнения проекта методами теории нечетких логических множеств, предварительных и последующих лабораторных экспериментов проводился анализ линейки сбалансированных рецептур кормов, а также ее синтез с использованием пакета *MatLab*.

Состав кормов для непродуктивных животных не регламентирован ГОСТами, поэтому создавать рецептуру каждый раз надо отдельно, учитывая, разнообразие ассортимента корма даже в рамках одной марки. В настоящее время разработка новых рецептур осуществляется на основе производственного эксперимента, требующего достаточно больших затрат сырья (на 50–100 экспериментов) и простоя основной массы производственных мощностей в процессе выпуска пробных партий кормов.

Избежать этих проблем позволяет математическое моделирование. Нестабильные качественные показатели сырья и взаимодействие компонентов смеси между собой затрудняют построение полной математической модели. Поэтому моделирование осуществляется методами нечеткого логического вывода (теория нечетких логических множеств). Преимуществом данного метода является возможность проведения анализа в условиях субъективной оценки эмпирических данных и отсутствии явной числовой формы результата.

Построение модели кормов проводится с использованием экспериментальных данных и сенсорного анализа. Разрабатываемый алгоритм базируется на теории нечетких логических множеств и состоит из следующих этапов.

1. Определение основных ингредиентов рецептурной смеси с учетом принципов сбалансированности состава и доступности использования сырья.
2. Определение основных входных переменных и выходной переменной модели.
3. Определение диапазона измерений переменных.
4. Составление базы правил для разрабатываемой модели.
5. Моделирование рецептуры корма для непродуктивных животных из выбранных ингредиентов в пакете *MatLab* модуле *Fuzzy Logic* по заданной базе правил с использованием теории нечетких логических множеств.
6. Анализ полученных результатов моделирования. Если результат не удовлетворителен, то выполняется возврат к пункту 2 данного алгоритма.
7. Проверка адекватности полученной модели опытным способом. Если она не подтверждается экспериментальными исследованиями, то выполняется возврат к пункту 4 алгоритма и редактируется база правил с учетом опытных данных. Повторять пункты 4–7 данного алгоритма необходимо вплоть до достижения удовлетворительного результата.

Входными переменными для моделирования на основе анализа источников [1, 2] были выбраны следующие параметры, с указанием диапазона изменений:

- pH: 5–8 (СанПин 2.3.2.1078-01.);
 - влажность: 7–11 % (ГОСТ 50817-95);
 - концентрация белковой составляющей: 50–90 %;
 - размер частиц: 0,3–0,8 мм (ГОСТ Р 52427-2005);
 - энергетическая ценность: 100–500 ккал/100 г корма;
 - общая биологическая обсемененность: 0–1000 клеток в 1 г корма (ГОСТ Р 50454-92).
- Выходной переменной является уровень потребления корма.

Тип функции принадлежности каждой переменной соответствует распределению по Гауссу. График принадлежности функций после задания типа распределения изображен на рис. 1. Связь входных переменных с выходными задают правила ввода, которые должны быть включены в систему после построения функций принадлежности. В окно задания базы правил (рис. 2) вводятся соответствующие правила, связывающие входные переменные с выходной. Для данной модели база знаний содержит 21 правило.

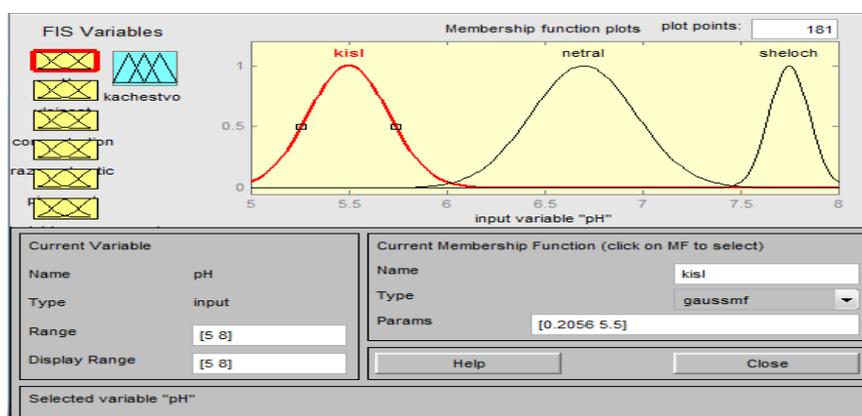


Рис. 1. Задание характеристик входной переменной

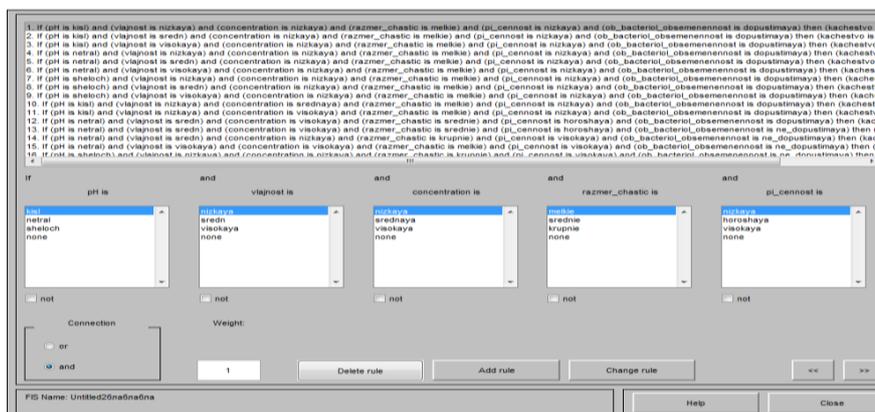


Рис. 2. Редактор правил

Главное окно средства просмотра (рис. 3) состоит из нескольких графических окон, расположенных по строкам и столбцам. Количество строк определяется числом правил нечеткого логического вывода, а количество столбцов – числом входных и выходных переменных, заданных в разрабатываемой системе. В каждом окне отображается соответствующая функция принадлежности, уровень ее среза (для входных переменных) и вклад в общий результат (для выходных переменных). Дополнительное графическое окно служит для отображения результата нечеткого логического вывода и операции дефазификации.



Рис. 3. Средство просмотра правил вывода

По результатам проведенного анализа (рис. 3) были определены оптимальные значения параметров для достижения наилучших органолептических показателей, оцененных по уровню потребления корма животными. Таким образом, было выявлено, что наилучшие органолептические характеристики достигаются при следующих значениях основных параметров: рН – 6,5; влажность – 9 %; концентрация белковой составляющей – 85 %; размер частиц – 0,55 мм; пищевая ценность – 267 ккал/100 г корма.

По результатам моделирования показателей качества кормов проведены эмпирические исследования, подтвердившие эффективность использования данного метода при разработке новых видов кормов с заданными качественными характеристиками.

В ходе эксперимента были составлены и исследованы рецептурные смеси для производства сухого сбалансированного кошачьего корма супер-премиум-класса, отличающиеся от рецептур кормов, производимых в нашей стране, высокой энергетической ценностью и достаточным содержанием белка, которое обеспечивалось наличием в его составе мяса цыпленка, меланжа сухого и молока цельного сухого. Исходные процентные соотношения ингредиентов рецептурной смеси были определены на основании анализа литературных источников [1–4]. В Таблице представлены исследуемые рецептуры кормов и функционально-технологические показатели соответствующих им рецептурных смесей.

Таблица

Рецептуры кормов для непродуктивных животных

Ингредиенты смеси	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мясо цыпленка, %	3	5	3	3	3	1	1	1	4	4
Рисовая мука, %	2	5	5	1	1	1	4	1	5	26
Меланж сухой, %	4	1	2	5	5	5	1	4	4	20
Молоко цельное сухое, %	1	1	1	2	5	4	1	5	4	20
Жир говяжий топленый, %	1	9	9	9	3	9	9	9	2	19
Вода, %	9	1	1	1	1	1	1	1		10
Дрожжи, %	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Функционально-технологические показатели смеси										
рН смеси	6	6	6	6	6	6	5	6	8	7,5
Влажность, %	9	1	1	1	5	7	8	8	6	10
Содержание белка, г	1	2	2	2	1	2	8	2	7	10,
Энергетическая ценность, ккал/100 г смеси	2	2	2	2	4	3	3	3	3	334

Таким образом, экспериментальное исследование показало, что корм с максимальным уровнем потребления непродуктивными животными, соответствует рецептуре № 1 (Таблица). Его влажность составляет 9 %, он имеет оптимальную энергетическую ценность

267 ккал/100 г, способную покрыть суточные энергетические затраты (258 ккал) среднестатистического животного (весом 2,5 кг в возрасте от одного года до семи лет) с рекомендуемой суточной нормой потребления корма (70 г), а также не содержит избытка каллоража, что могло бы привести к возникновению у животного лишнего веса. Содержание белка в корме данной рецептуры (19,4 г) обеспечивает не только нормальный азотистый баланс в организме животного, но и позволяет поддерживать стабильный индекс мышечной массы тела (для которого требуется в 3,5 раза больше белка). В настоящий момент это требование не соблюдено большинством российских производителей кормов.

Данный эксперимент подтвердил результаты математического моделирования для переменных входных модели: концентрации белкового компонента и влажности рецептурной смеси. Анализ показал, что чрезмерное увеличение или наоборот – уменьшение влажности кормов ведет к ухудшению органолептических и микробиологических показателей их качества, а концентрация белкового компонента должна находиться на уровне 50–70%. Уменьшение доли белка ведет к снижению пищевой ценности кормов и привлекательности их для животного, а увеличение – к излишним экономическим затратам и дисбалансу рациона питания.

Заключение

Анализ рецептур кормов для непродуктивных животных и методов их разработки, проведенный на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области, показал необходимость создания и внедрения новых сбалансированных рецептур. Предложенный алгоритм математической модели рецептур кормов на основе теории нечетких логических множеств позволит упростить процесс ее разработки, а также снизить временные и материальные затраты предприятий, занятых производством кормов, при расширении ассортимента и внедрении нового вида продуктов.

Проведенное эмпирическое исследование подтвердило адекватность полученной математической модели составления рецептур кормов. Использование ее на предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области позволит оптимизировать количественные и качественные характеристики рецептурной смеси, усовершенствовать управление процессами производства и контроля качества продукции.

На основе предложенной в проекте математической модели создан сбалансированный натуральный экструдированный корм для непродуктивных животных и разработан способ его производства (патент № 2606908).

В настоящее время проводится апробирование метода в опытно-промышленных условиях и при положительных результатах планируется внедрение его в производство.

Публикации

1. Аксенова О.И. Определение зависимости уровня потребления корма от функционально-технологических показателей рецептурной смеси // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2016. Т. 19. № 4. С. 830–841.
2. Аксенова О.И. Математическое моделирование составления рецептур экструдированных продуктов питания // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего — наука молодых». Т. 1. 2016. С. 20–22.
3. Аксенова О.И., Алексеев Г.В., Дерканосова А.А. Оптимизация рецептуры кормов непродуктивных животных с помощью математического моделирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1 (63). С. 28–35.
4. Аксенова О.И., Алексеев Г.В. Математическое моделирование рецептур экструдированных продуктов питания // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Ч. II: Материалы конференции. СПб., 2015. С. 19–22.

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

5. Аксенова О.И., Алексеев Г.В. Использование математического моделирования для ресурсосберегающих пищевых производств // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 3 (21). С. 1–10.
6. Аксенова О.И., Алексеев Г.В., Холявин И.И. Использование математического моделирования для оценки экономической эффективности в реальном секторе экономики // Журнал правовых и экономических исследований. 2014. № 3. С. 156–162.
7. Патент на изобретение 2606908 Российская Федерация. Натуральный экструдированный корм для кошек и способ его производства / О.И. Аксенова, Г.В. Алексеев, М.В. Гончаров, М.Г. Куликова. Опубл. 10.01.17.

Литература

1. Мишанин А.Л. Повышение эффективности приготовления экструдированного корма с обоснованием параметров матрицы пресс-экструдера: дис. ... канд. техн. наук. Пенза., 2010. – 158 с.
2. Рудой Д.В. Исследование технологического процесса и определения рациональных параметров шнекового экструдера для производства комбикормов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2015. – 20 с.
3. Абрамов О.В. Научное обеспечение процесса экструзии модельных сред на основе крахмалсодержащего сырья и разработка высокоэффективного оборудования для его реализации: дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2009. – 600 с.
4. Alam M.S. et al. Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016. Vol. 56. No 3. P. 445–473.



Алексеева Мария Сергеевна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра пищевой биотехнологии продуктов из растительного сырья
E-mail: alexeevams@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПШЕНИЧНОГО КВАСА

М.С. Алексеева

Научный руководитель – доцент П.Е. Баланов

Цель проекта – разработка технологии пшеничного кваса и проведение исследования образцов напитка, изготовленных из различного сырья и сброженных при помощи нескольких штаммов микроорганизмов.

В качестве сырья были выбраны: пшеничный солод с высокой экстрактивностью и низким содержанием белка, неохмеленный пшеничный экстракт и пшеничная мука. С использованием этих ингредиентов было приготовлено несколько образцов кваса по различным рецептурам. На первых этапах основными параметрами анализа были органолептические характеристики продукта, поэтому квас из пшеничной муки был исключен из дальнейших исследований. Квасы из пшеничного солода и пшеничного экстракта обладали приятный вкусовой профиль, но значительно отличались друг от друга [1, 2].

В процессе исследования также решалась задача подбора штамма микроорганизма для получения пшеничного кваса с определенными органолептическими характеристиками. Для формирования вкусового профиля непосредственную роль играет выбор штамма микроорганизма. Наиболее подходящими оказались дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, применяемые для сбраживания пшеничного пива (W68, W320, WB-06). Исходя из того, что по типу брожения молочнокислые бактерии делятся на гомоферментативные и гетероферментативные, для получения более достоверных результатов эксперимента были подобраны разные виды бактерий, а именно: *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus fermenti*, *Lactobacillus brevis* [3].

Используя уже полученную рецептуру, разработанную технологию и имеющиеся компоненты, для сравнения органолептических показателей пшеничного кваса было подготовлено несколько образцов последнего, сброженного на разных культурах дрожжей и молочнокислых бактерий. Каждый образец подвергался исследованиям по ГОСТ 31494-2012 для выбора образца с наилучшими органолептическими и физико-химическими характеристиками. Весомого отличия в физико-химических показателях у образцов пшеничного кваса не наблюдалось. Три из двенадцати сброженных при помощи штамма W 320 образцов имеют наилучшие показатели. Они характеризуются: объемной долей спирта 0,5–0,6 % об., средним количеством CO₂ 0,3–0,33 %, кислотностью 1,5–2 к. ед., мягким вкусом и ароматом от тонкого фруктового до резкого, обусловленного присутствием диацетила, ацетальдегида, глицерина и бутандиола. Для выявления наиболее подходящих молочнокислых бактерий требуется провести ряд опытов [2, 4].

Одним из направлений исследований является увеличение биологической и коллоидной стойкости пшеничного кваса в процессе хранения. В этой связи было рассмотрено несколько вариантов его осветления в лабораторных условиях, а именно фильтрование с помощью марлевой ткани, специальных веществ-осветлителей, фильтровальной бумаги и фильтровальной бумаги с намывкой кизельгура. Результаты осветления представлены на рис. 1 (слева направо соответственно). Четыре образца в верхнем и нижнем ряду сфотографированы при разном освещении для лучшего обзора опалесценции и осадка.



Рис. 1. Образцы осветленного пшеничного кваса с использованием различных технологий

Заключение

К настоящему моменту решены такие задачи, как разработка лабораторной технологии изготовления кваса из пшеничного сырья, предложены рецептуры напитка, выполнен подбор сырья и микроорганизмов для брожения [1, 3].

Полученный в лабораторных условиях продукт, воссозданный по старинным рецептурам, увеличит ассортимент безалкогольных напитков, произведенных из натуральных ингредиентов. В его составе отсутствуют синтетические консерванты,

искусственные красители и усилители вкуса. Из группы потребителей придется исключить только больных целиакией, то есть обладающих непереносимостью глютена.

Уникальность игристого пшеничного кваса обусловлена его составом и органолептическими характеристиками (сбалансированным приятным кисловатым вкусом со слабовыраженным ароматом, в котором различимы легкие цитрусовые нотки) [1, 3].

Полученный напиток можно рекомендовать к локальному и массовому производству, так как его физико-химические и органолептические характеристики соответствуют всем нормативам, действующим на территории Российской Федерации [2, 3].

Публикации

1. *Алексеева М.С.* Побочные продукты метаболизма молочнокислых бактерий и дрожжей в пшеничном квасе // Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2017. С. 10–12.
2. *Алексеева М.С.* Разработка рецептуры и технологии кваса из пшеничного сырья // Вестник КрасГАУ. 2016. № 10. С. 151–155.
3. *Alekseeva M.S.* Development of technology of wheat kvass // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2016. С. 20–22.

Литература

1. *Алексеева М.С.* Разработка рецептуры и технологии кваса из пшеничного сырья // Вестник КрасГАУ. 2016. № 10. С. 151–155.
2. *Помозова В.А.* Производство кваса и безалкогольных напитков: учебное пособие. СПб., 2006. – 192 с.
3. *Алексеева М.С.* Побочные продукты метаболизма молочнокислых бактерий и дрожжей в пшеничном квасе // Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2017. С. 10–12.
4. *Захарова А.В., Масловский С.А.* Технологическая оценка видов хлебных квасов, произведенных по различным технологиям // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 3–1. С. 80–83.



Алышев Александр Сергеевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра технологии приборостроения
E-mail: aalyshev@yandex.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИСОЕДИНЕННЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ МОДЕЛЕЙ СУДОВ АДАПТИВНЫМИ И РОБАСТНЫМИ АЛГОРИТМАМИ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ

А.С. Алышев

Научный руководитель – профессор В.Г. Мельников

Цель проекта – разработка новых экспериментальных методов и стендов для идентификации присоединенных моментов инерции моделей судов.

В ходе выполнения работы был проведен обзор методов и устройств по определению компонентов тензора присоединенных моментов инерции для моделей судов. Разработан новый экспериментальный метод, основанный на модификации метода энергии с применением управляемых программных и полупрограммных реверсивно-симметричных движений. Для апробации метода разработан экспериментальный стенд. Эффективность метода была подтверждена путем математического моделирования движения нелинейных систем с использованием робастных и адаптивных алгоритмов управления. Для апробации метода и алгоритма управления на одной из вариации установки (рис. 1) был проведен эксперимент по определению присоединенного момента инерции по углу рыскания. Сконструирован опытный бассейн с размерами 1,5 x 1,5 x 0,3 м и модель судна со следующими параметрами: длина $LOA = 0,8$ м, длина между перпендикулярами $L_{pp} = 0,72$ м, ширина $B = 0,2$ м, высота $H = 0,13$ м, осадка (с одним сервоприводом) $T = 0,08$ м, водоизмещение $D = 0,075$ т, площадь по ватерлинии $S_w = 0,104$ м² и коэффициент общей полноты $\delta = 0,72$. Использован 90 Вт сервопривод постоянного тока *Maxon 132533* с тахометром *DCT 22* и сервоусилителем *Maxon 4-Q-DC ADS 50/5 50V/5A*, плата обработки сигналов 12 бит *ICP DAS 1202LU*, энкодер *E30S4-3000-6-L-5*, изготовлен набор дюралюминиевых маховиков с разными моментами инерции.

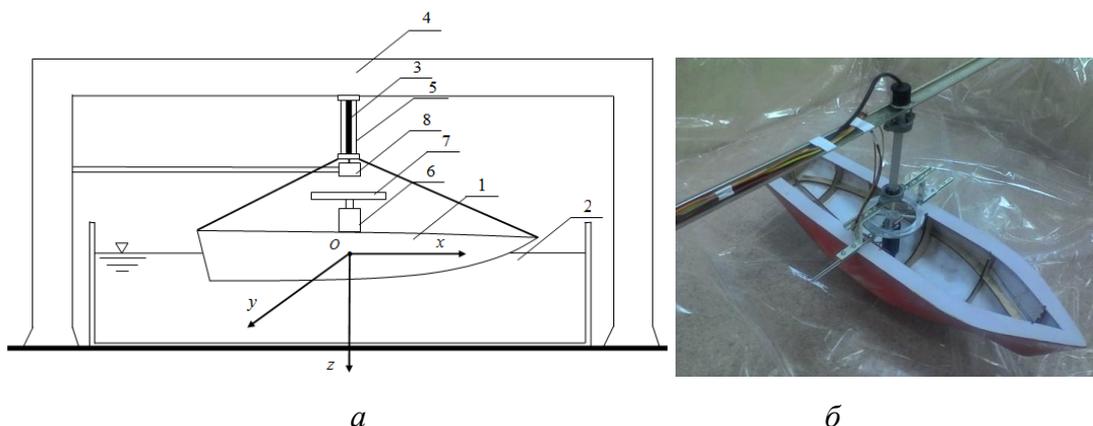


Рис. 1. Испытательный стенд для определения присоединенного момента инерции λ_{66} по углу рыскания: а – схема стенда (1 – корпус судна, 2 – опытный бассейн, 3 – торсион, 4 – опора бассейна, 5 – полый вал с подшипниковыми опорами, б – сервопривод с датчиком скорости, 7 – маховик, 8 – датчик угла поворота); б – прототип стенда

Рассматривался симметричный относительно диаметральной плоскости корпус судна с тензором присоединенных моментов инерции J_{am} (λ_{44} , λ_{55} и λ_{66} – осевые присоединенные моменты инерции, λ_{46} и λ_{64} – центробежные присоединенные моменты инерции) [1]:

$$J_{am} = \begin{bmatrix} \lambda_{44} & 0 & \lambda_{46} \\ 0 & \lambda_{55} & 0 \\ \lambda_{64} & 0 & \lambda_{66} \end{bmatrix},$$

для которого получены математические модели вращательных движений гидромеханической системы по углу крена:

$$(J_{xx} + J_w + J_s + \lambda_{44})\ddot{\phi} + J_w\dot{\Omega}_1 = -M_\phi - b_{144}\dot{\phi} - b_{244}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - f_{11}\dot{\phi},$$

$$J_w\ddot{\phi} + J_w\dot{\Omega}_1 = M_1 - f_{12}\text{sign}\dot{\Omega}_1 - f_{13}\dot{\Omega}_1,$$

по углу дифферента:

$$\begin{aligned} (J_{yy} + J_w + J_s + \lambda_{55})\ddot{\theta} + J_w\dot{\Omega}_2 &= -M_\theta - b_{255}\dot{\theta} - b_{255}\dot{\theta}|\dot{\theta}| - f_{21}\dot{\theta}, \\ J_w\ddot{\theta} + J_w\dot{\Omega}_2 &= M_2 - f_{22}\text{sign}\dot{\Omega}_2 - f_{23}\dot{\Omega}_2, \end{aligned}$$

по углу рыскания:

$$\begin{aligned} (J_{zz} + J_w + J_s + \lambda_{66})\ddot{\phi} + J_w\dot{\Omega}_3 &= -c\phi - b_{166}\dot{\phi} - b_{266}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - f_{31}\dot{\phi}, \\ J_w\ddot{\phi} + J_w\dot{\Omega}_3 &= M_3 - f_{32}\text{sign}\dot{\Omega}_3 - f_{33}\dot{\Omega}_3, \end{aligned}$$

и совместно по углу крена и рыскания учетом компенсации вращения по углу дифферента:

$$\begin{aligned} (J_{xx} + J_w + J_s + J_{st} + J_{wt} + \lambda_{44})\ddot{\phi} - (J_{xz} + \lambda_{46})\ddot{\phi} + J_w(\dot{\Omega}_1 - \Omega_2\dot{\phi}) &= -M_\phi - b_{144}\dot{\phi} - b_{244}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - \\ - b_{146}\dot{\phi} - b_{246}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - f_{11}\dot{\phi} &, \\ J_w\ddot{\phi} + J_w\dot{\Omega}_1 &= M_1 - f_{12}\text{sign}\dot{\Omega}_1 - f_{13}\dot{\Omega}_1, \\ (J_{zz} + J_w + J_s + J_{st} + J_{wt} + \lambda_{66})\ddot{\phi} - (J_{zx} + \lambda_{64})\ddot{\phi} + J_w(\dot{\Omega}_3 + \Omega_2\dot{\phi}) &= -c\phi - b_{166}\dot{\phi} - b_{266}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - \\ - b_{146}\dot{\phi} - b_{246}\dot{\phi}|\dot{\phi}| - f_{31}\dot{\phi} &, \\ J_w\ddot{\phi} + J_w\dot{\Omega}_3 &= M_3 - f_{32}\text{sign}\dot{\Omega}_3 - f_{33}\dot{\Omega}_3, \end{aligned}$$

где ϕ , θ и φ – углы крена, дифферента и рыскания корпуса судна соответственно; Ω_i – угловая скорость i -го маховика; J_w и J_{wt} – осевой и поперечный моменты инерции маховика; J_s и J_{st} – осевой и поперечный моменты инерции статора двигателя; J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} , J_{xz} , J_{zx} – компоненты тензора инерции корпуса судна на воздухе; M_i – момент создаваемый двигателем; M_ϕ и M_θ – восстанавливающие моменты, для которых на малых углах справедливо: $M_\phi = Dh \sin \phi$, $M_\theta = DH \sin \theta$; D – водоизмещение корпуса судна; h и H – поперечная и продольная метацентрическая высота; b_i – коэффициенты гидродинамического сопротивления; c – жесткость торсиона на кручение; f_{i1} – коэффициенты вязкого трения в опоре стенда; f_{i2} и f_{i3} – коэффициенты сухого и вязкого трения в подшипниках двигателя.

В общем виде установка включает в себя трехосевой карданов подвес, к которому прикреплено судно, установленное в опытовом бассейне. Оси вращения карданного подвеса можно зафиксировать для проведения идентификации осевых присоединенных моментов инерции. На судне взаимоперпендикулярно установлены сервоприводы с маховиками, необходимые для обеспечения симметрии движений. В опытах по идентификации центробежных моментов инерции два сервопривода служат для задания программных движений по двум углам, а третий – для компенсации движения по третьему углу.

Разработанный метод идентификации основан на энергетическом подходе с использованием реверсивно-симметричных движений [2]. На первом этапе эксперимента судно отклоняется на заданный угол (углы), и производится свободное разгонное и далее затухающее вращательное движение. В эксперименте по углу рыскания движение задается при помощи торсиона, который скреплен с опорой бассейна скользящей заделкой для компенсации продольной деформации. Затухающее вращательное движение записывается при помощи датчика угла, аппроксимируется и служит в качестве задающего воздействия в обратном направлении для регулятора следящей системы на втором этапе.

На втором этапе происходит определение работ крутящего момента сервопривода и замеряется угловая скорость маховика датчиком скорости. Сервопривод является специальным измерительным устройством, у которого параметры его математической модели являются заранее идентифицированными с учетом потерь мощности, а также

определен тензор инерции корпуса модели судна на воздухе. Для двух движений выбираются два симметричных интервала, для которых строятся уравнения изменения энергии. Для опыта по углу рыскания:

$$T_{\varphi_2} - T_{\varphi_1} + \Pi_{\varphi_1} - \Pi_{\varphi_2} = A_{\varphi_1\varphi_2} + B_{\varphi_1\varphi_2} + D_{\varphi_1\varphi_2}, \quad T'_{\varphi_1} - T'_{\varphi_2} + \Pi'_{\varphi_2} - \Pi'_{\varphi_1} = A_{\varphi_2\varphi_1} + B_{\varphi_2\varphi_1} + C_{\varphi_2\varphi_1}.$$

Здесь T_{φ_i} , и Π_{φ_i} – узловые значения кинетической и потенциальной энергии системы; $A_{\varphi_1\varphi_2}$ и $A_{\varphi_2\varphi_1}$ – затраченные (полные) работы сервопривода на выбранном интервале, равные расходам электроэнергии; $B_{\varphi_1\varphi_2}$ и $B_{\varphi_2\varphi_1}$ – диссипативные потери энергии в электродвигателе; $C_{\varphi_1\varphi_2}$ и $C_{\varphi_2\varphi_1}$ – работы момента гидродинамического сопротивления жидкости. Кинетические энергии, относящиеся к обратному движению, обозначены штрихом. Поскольку работы $C_{\varphi_1\varphi_2}$

и $C_{\varphi_2\varphi_1}$ при любом порядке полинома гидродинамического момента $M_{d\varphi} = \sum_{k=1}^K \mu_{66k} \dot{\varphi} |\dot{\varphi}|^{k-1}$

всегда отрицательны и не меняют своего знака, то для симметричных участков движения эти работы равны. Вычитая уравнение энергии с учетом симметрии движений, получены расчетные формулы для вычисления присоединенного момента инерции по углу рыскания и аналогично по другим углам. Для определения центробежных моментов инерции предложено проводить симметричные сферические движения по двум углам с одинаковой скоростью. Регуляторы для следящей системы по углу поворота модели судна построены по алгоритму управления по выходу «последовательный компенсатор» [3], который обеспечил слежение за программной траекторией. Алгоритм в общем виде выглядит следующим образом:

$$u(t) = -(k + \gamma)\alpha(p)\xi_1(t),$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) = \sigma\xi_2(t), \\ \dot{\xi}_2(t) = \sigma\xi_3(t), \\ \dots \\ \dot{\xi}_{p-1}(t) = \sigma(-k_1\xi_1(t) - k_2\xi_2(t) - \dots - k_{p-1}\xi_{p-1}(t) + k_1e(t)) \end{cases}$$

Типичный график ошибки представлен на рис. 2.

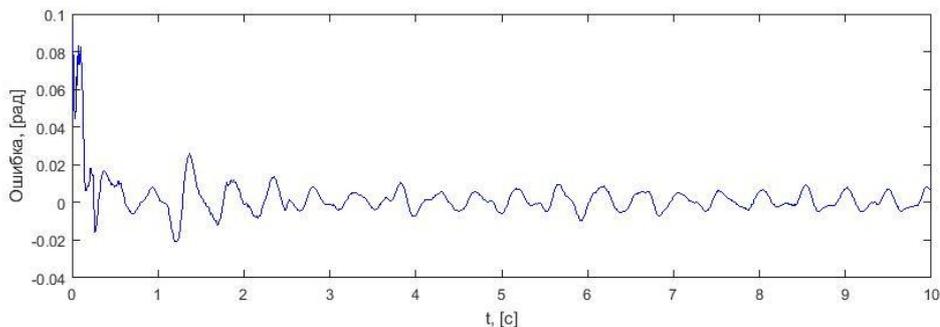


Рис. 2. Ошибка слежения в опыте по идентификации λ_{66}

Полученные результаты были сравнены с существующими теоретическими и экспериментальными методами и показали хорошую сходимость. Для сравнения использовались метод плоских сечений с двухпараметрическими шпангоутами Льюиса и теоретико-экспериментальный метод Б.В. Палагушкина [4–6].

Заключение

В ходе выполнения проекта были решены задачи по модификации метода энергий для экспериментального определения компонентов тензора присоединенных моментов инерции моделей судов на основе управляемых программных и полупрограммных движений,

разработан экспериментальный стенд, применены на практике адаптивные и робастные алгоритмы для синтеза систем управления вращательными движениями модели судна, получен экспериментальный результат.

Область применения проекта относится к судостроению и экспериментальной гидромеханике. Результаты могут быть использованы при анализе инерционных параметров и мореходных качеств судов на этапах их проектирования, а также для уточнения параметров математических моделей движения судов в судоводительских тренажерах.

Публикации

1. Патент на изобретение 2627023 Российская Федерация. Способ идентификации присоединенного момента инерции тела и устройство для его осуществления / А.С. Алышев, Г.И. Мельников, В.Г. Мельников. Опубл. 02.08.2017.
2. Алышев А.С., Мельников В.Г. Метод идентификации присоединенного момента инерции корпуса судна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 744–748.
3. Алышев А.С., Мельников В.Г., Мельников Г.И. Идентификация момента инерции маятниковой системы в условиях вязкого трения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 928–935.
4. Алышев А.С. Обзор методов идентификации присоединенных моментов инерции судов // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 1. СПб., 2016. С. 57–60.
5. Melnikov G.I., Dudarenko N.A., Melnikov V.G., Alyshev A.S. Parametric identification of inertial parameters // Applied Mathematical Sciences. 2015. Vol. 9. No 136. P. 6757–6765.
6. Алышев А.С., Мельников В.Г. Метод идентификации моментов инерции космического аппарата на геостационарной орбите // Фундаментальные и прикладные задачи механики: тезисы докладов международной научной конференции, посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского / Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики». М., 2017. С. 117.
7. Мельников Г.И., Мельников В.Г., Дударенко Н.А., Алышев А.С., Иванова Л.Н. Последовательности дифференциальных неравенств для функций Ляпунова в оценках устойчивости нелинейных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 947–951.
8. Заявка на патент «Способ идентификации тензора присоединенных моментов инерции и демпфирования угловых колебаний тела и устройство для его осуществления» / А.С. Алышев, В.Г. Мельников (на рассмотрении).
9. Alyshev A.S., Dudarenko N.A., Melnikov V.G. Adaptive identification of inertial parameters of reaction wheel pendulums. // IEEE Transactions on Control Systems Technology (under review).

Литература

1. Павловский В.А. Тензорная форма записи для коэффициентов присоединенных масс // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 1. 2008. Вып. 1. С. 109–117.
2. Мельников В.Г. Методы и приборы измерения инерционных параметров тел и формирования качественных параметров нелинейных твердотельных систем: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2013. – 260 с.
3. Пыркин А.А. Адаптивное управление в условиях запаздывания, неполной информации о параметрах и переменных состояния системы: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2015. – 347 с.
4. Korotkin A.I. Added masses of ship structures. Houten, 2009. – 392 p.
5. Палагушкин Б.В. Гидродинамические аспекты безопасности движения судов на неустановившихся режимах: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1996. – 375 с.
6. Gerritsma Ir.J. Experimental identification of damping, added mass and added mass moment of inertia of a shipmodel: publication no 8. Delft, 1957. – 16 p.



Астрединова Надежда Витальевна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра технологий интроскопии
E-mail: astra-nadezhda@ya.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ТИПА «НЕСПАЙ» И «ЧАСТИЧНЫЙ НЕПРОПАЙ» В ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Н.В. Астрединова

Научный руководитель – доктор технических наук А.В. Федоров

Цель работы – контроль качества паяного соединения на всех участках камеры жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) с возможностью оценки запаса прочности данной сборочной единицы.

В ходе создания метода поиска дефектов типа «неспай» и «частичный непропай» в паяных соединениях исследовались камеры сгорания ЖРД (рис. 1), которые представляют собой сложную систему взаимосвязи работы узлов и агрегатов, а также сложную технологию изготовления, связанную с соблюдением геометрических параметров ЖРД. Последние имеют ряд характерных отличий от других изделий общего и специального машиностроения:

- эксплуатационную нагруженность;
- сложность конструктивных форм несущих элементов, которая создает высокие концентрации напряжений;
- широкий спектр конструкционных материалов;
- большое количество технологических процессов изготовления и соединения материалов;
- применение передовых достижений в науке, технике и технологии.

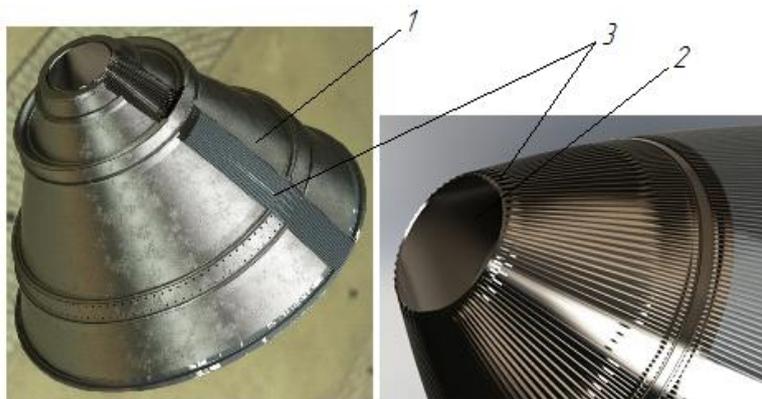


Рис. 1. Конструктивная схема камеры ЖРД: 1 – наружная прочностная оболочка; 2 – внутренняя огневая оболочка; 3 – ребра

Неразъемные соединения камер сгорания ЖРД получают с помощью пайки. Паяные соединения обеспечивают необходимую конструктивную прочность, геометрическую точность, герметичность и коррозионную стойкость узлов. Основным свойством паяного шва, определяющим его качество, является разрывная прочность паяного соединения, величина которой зависит от количества и характера дефектов в шве [1].

Согласно ГОСТ 24715 и ОСТ 92-1190, к основным дефектам паяных соединений относятся непропай и неспай, которые могут привести к прогару камеры с последующим разрушением ее сопла. Для предотвращения разрушения сопла камеры и самого ЖРД на всех этапах производства необходимо проводить контроль качества паяных соединений. Трудность выявления дефектов пайки узлов камеры сгорания заключается в том, что соединение деталей происходит по большой площади при малой толщине пакета. Почти все швы при этом получаются закрытыми, недоступными осмотру и простому контролю.

Основным стандартом, устанавливающим методы контроля качества паяных соединений, является ГОСТ 24715. В нем представлены методы неразрушающего и разрушающего контроля, которые распространяются как на поверхностные, так и на внутренние дефекты.

Несмотря на четкое классификационное различие методов неразрушающего и разрушающего контроля, следует выбирать такой из них, при котором контроль будет более эффективным. При этом необходимо учитывать следующие факторы [2]:

- особенность контролируемых деталей;
- особенность дефектов, подлежащих обнаружению;
- доступность контролируемого участка;
- разрешающую способность (чувствительность) метода.

Основная роль при выборе метода контроля отводится виду и местоположению дефектов. В данном проекте исследуются внутренние дефекты.

Анализ неразрушающих методов контроля качества паяных соединений показал, что перспективным является лазерно-ультразвуковой метод, основанный на оценке параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте исследования (контроля). Главными его достоинствами являются [3]:

- обнаружение дефектов, находящихся глубоко внутри материала за счет улучшенной проникающей способности;
- высокая чувствительность при обнаружении чрезвычайно малых дефектов (длиной в несколько миллиметров);
- точность определения местоположения внутренних дефектов, оценка их размера, характеристики направления, формы и природы;
- оценка прочностных свойств объекта контроля;
- достаточность доступа только к одной из сторон объекта контроля;
- объемное сканирование, позволяющее охватить объект контроля целиком.

В рамках проекта было проведено моделирование распространения ультразвуковых волн в паяных соединениях как в бездефектных, так и в дефектных (рис. 2). Оно основывалось на следующих амплитудно-частотных характеристиках ультразвукового сигнала [4, 5]:

- отражение ультразвукового сигнала от внешней стенки сопла камеры ЖРД (донный сигнал) – бездефектное паяное соединение;
- отражение ультразвукового сигнала от дефекта типа «непропай» или «неспай»;
- отражение ультразвукового сигнала от дефекта типа «частичный непропай».

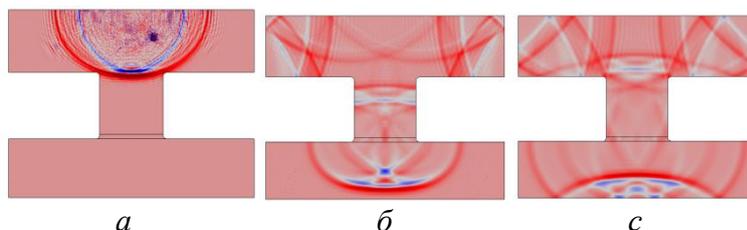


Рис. 2. Распространение ультразвуковой волны в паяном соединении:
а – начало распространения; б – прохождение через паяное соединение;
с – отражение от внешней стенки

В бездефектном паяном соединении ультразвуковой сигнал доходит до внешней стенки сопла камеры ЖРД (рис. 3б), отражается от нее (рис. 3в) и возвращается в оптоакустический преобразователь. При этом амплитуда донного ультразвукового сигнала $A_{дон}$ равна 0,063 мВ, а время прохода ультразвуковой волны в паяном соединении составит: $\Delta\tau_1 = 1,3$ мкс. При этом амплитуда $A_{дон}$ и время $\Delta\tau_1$ соответствуют площади паяного соединения $S_{\Delta 1}$ (выделенная область на рис. 3б) на глубине залегания h , равной высоте ребра внутренней стенки сопла камеры с припоем.

Дефектограмма бездефектного паяного соединения представлена на рис. 3а. Анализируя ее, мы наблюдаем амплитуды зондирующего $A_{зонд}$ и донного $A_{дон}$ сигналов.

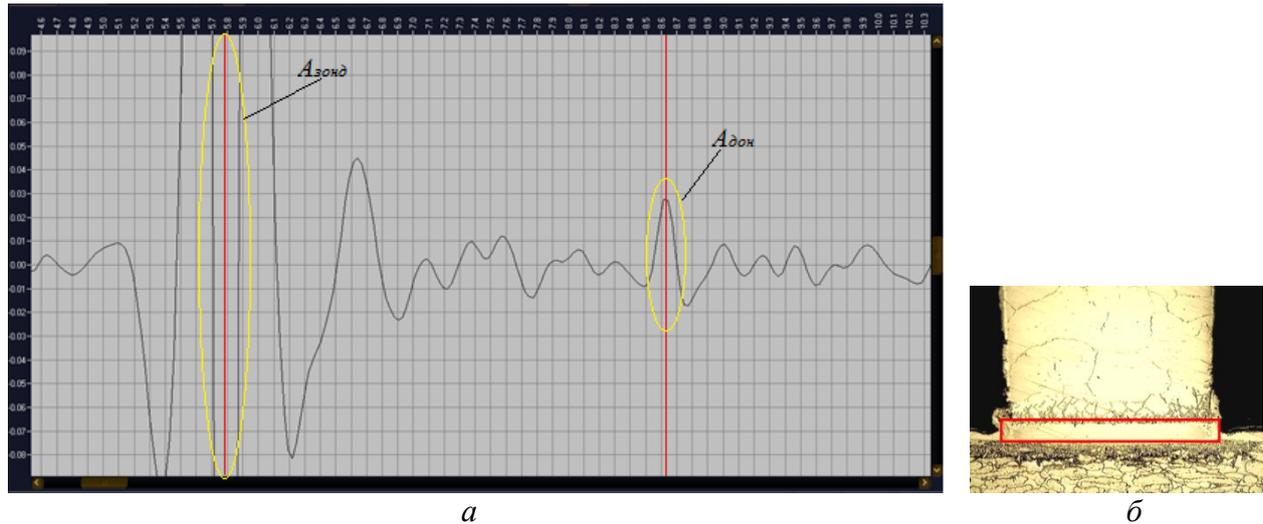


Рис. 3. Результаты контроля бездефектного паяного соединения: а – отражение донного сигнала; б – металлография бездефектного ребра

Для подтверждения полученных результатов проводилась металлография исследуемых соединений (рис. 3б).

При наличии дефекта «полный непропай», образующегося вследствие несплошного незаполнения паяльного зазора припоем, ультразвуковой сигнал будет отражаться от границы раздела сред «ребро – воздух» (рис. 4с). При этом амплитуда его $A_{дефект}$ равна 0,083 мВ, а время прохода в ребре (отсутствие паяного соединения) $\Delta\tau_2 = 0,78$ мкс. Эти параметры соответствуют площади дефекта «непропай» $S_{\Delta 2}$ (выделенная область на рис. 5б) на глубине залегания h , равной высоте ребра внутренней стенки сопла камеры.

Можно сделать вывод, что при наличии дефекта типа «непропай» выполняется условие $\Delta\tau_2 < \Delta\tau_1$. Для подтверждения результатов лазерно-ультразвукового контроля была проведена металлография дефектного ребра (рис. 5б).

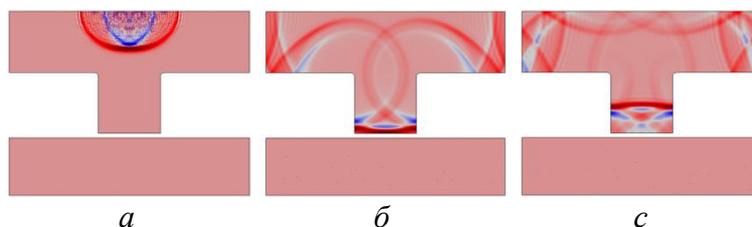


Рис. 4. Распространение ультразвуковой волны в паяном соединении с дефектом «непропай»: а – начало распространения; б – прохождение волны в ребре; с – отражение ее от дефекта «непропай»

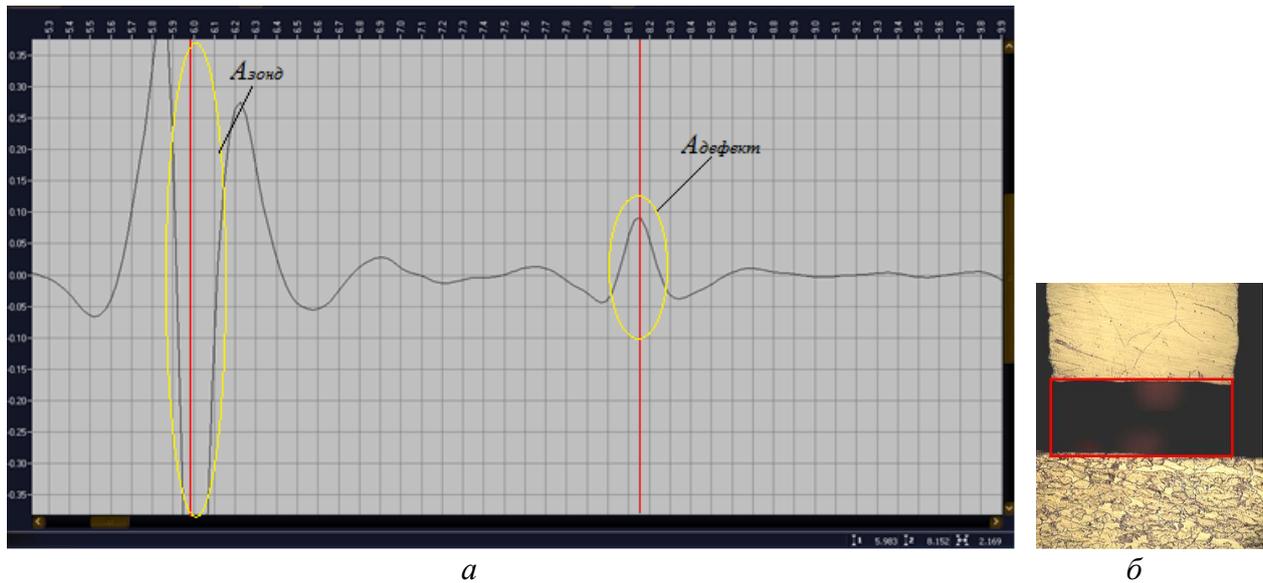


Рис. 5. Результаты контроля паяного соединения с дефектом типа «непропай»: а – отражение донного сигнала от дефекта; б – металлография ребра с дефектом

При наличии дефекта «частичный непропай» отражение ультразвукового сигнала происходит как от границы раздела «ребро – воздух», так и от внешней стенки сопла (донный сигнал) камеры ЖРД (рис. 6). Отражение ультразвуковых сигналов от дефекта «частичный непропай» и донного сигнала представлено на дефектограмме (рис. 7а).

При наличии такого дефекта часть энергии ультразвукового сигнала будет рассеиваться, что приведет к затуханию донного сигнала, а затем – к снижению амплитуды отраженного сигнала. При этом время прихода ультразвукового сигнала останется неизменным.

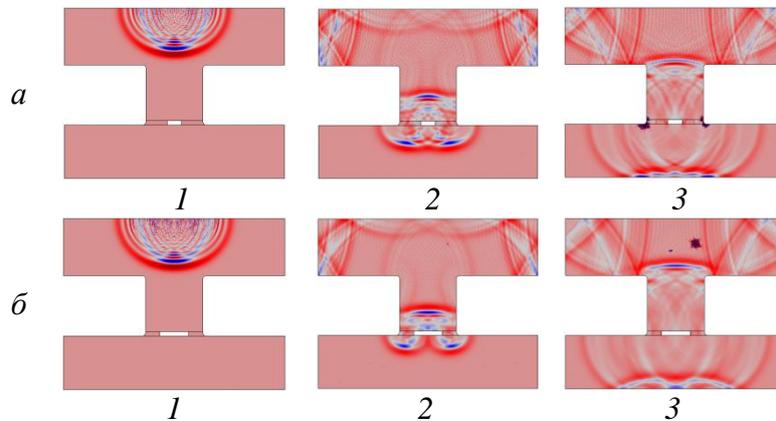


Рис. 6. Распространение ультразвуковой волны в паяном соединении с дефектом «частичный непропай» размером: а – 0,2 мм; б – 0,4 мм.
1 – начало распространения; 2 – прохождение волны через паяное соединение с дефектом;
3 – отражение от внешней стенки

Амплитуда сигнала от частичного непропая $A_{\text{част.непропай}} \approx A_{\text{дон.}}$ и время $\Delta\tau_3 = 1,3$ мкс. Эти параметры соответствуют площади дефекта «частичный непропай» $S_{\Delta 3}$ (выделенная область на рис. 7б) на глубине залегания h , равной высоте ребра внутренней стенки сопла камеры. Оценка величины частичного непропая выполнена на основе установления корреляционной связи относительной эффективной площади непропая $\bar{S}^{\text{эф}} = S_{\Delta 3} / S_{\Delta 2}$ (где $S_{\Delta 3}$ и $S_{\Delta 2}$ – площади частичного и полного непропая соответственно) с уровнем относительных амплитуд отраженных оптико-акустических сигналов $\bar{A} = A_{\text{част.непропай}} / A_{\text{дефект}}$: $\bar{S}^{\text{эф}} = f(\bar{A})$.

Также были проведены металлографические исследования на наличие дефекта «частичный непропай». Полученный металлографический снимок приведен на рис. 7б.

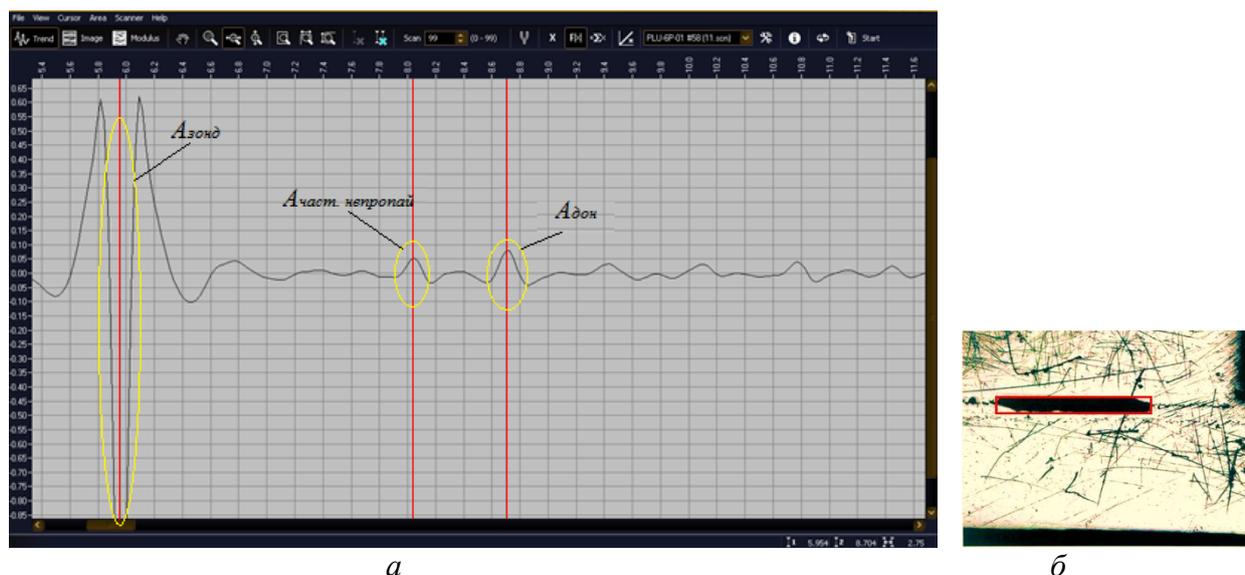


Рис. 7. Результаты контроля паяного соединения с дефектом типа «частичный непропай»: а – отражение ультразвукового сигнала от дефекта «частичный непропай» и стенки внешней; б – металлография дефектного ребра

В рамках выполнения проекта проводились исследования на определение усталостного разрушения конструкционного материала, а также оценки амплитудно-частотной характеристики отраженного сигнала. Известно, что малоцикловые усталости – это воздействия, которые реализуются длительное время без макроскопической деформации и высоких скоростей распространения дефектов. В процессе усталости происходит накопление усталостных повреждений, то есть необратимое изменение физико-механических свойств конструкционного материала под действием переменных напряжений. Оценка этих изменений на сегодняшний день проводится на основании изменения скорости распространения ультразвуковой волны в материале.

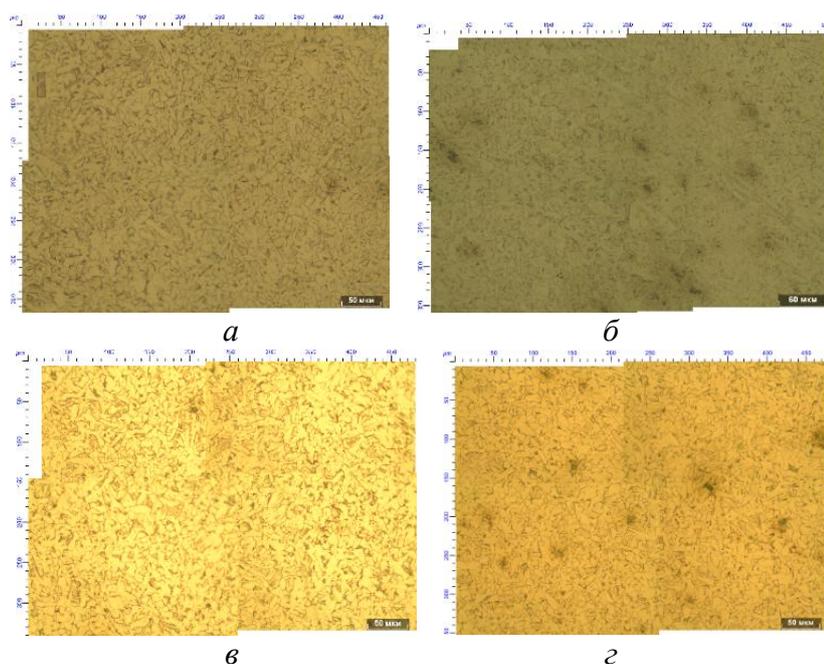


Рис. 8. Металлография конструкционного материала: а – исходное состояние; б – после 3000 циклов; в – после 6000 циклов; г – после 12000 циклов
Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

В проекте предложено определять изменение физико-механических свойств материала по амплитудно-частотной характеристике отраженного сигнала. С увеличением количества циклов «нагрузки – разгрузки» изменяется структура конструкционного материала, которая представлена на рис. 8. Структурные изменения приводят к рассеиванию ультразвукового сигнала в материале, следовательно – к изменению амплитудно-частотной характеристики отраженного сигнала (рис. 9).

На рис. 9 представлены кривые усталости в координатах: натуральный логарифм отношения амплитуды отраженного сигнала к амплитуде зондирующего сигнала от числа циклов.

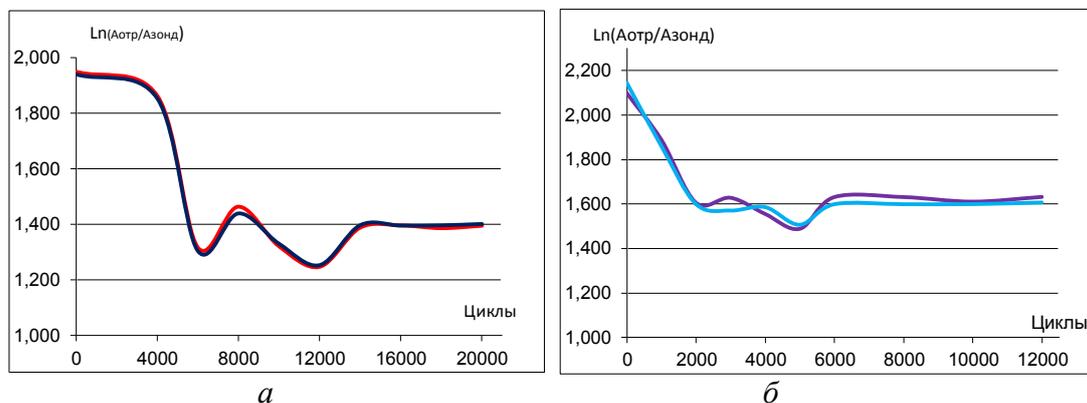


Рис. 9. Изменение амплитудно-частотных характеристик:
а – кривая усталости для спецстали; б – для Ст3

Проведенные в проекте исследования показали, что на качество паяного соединения влияют такие факторы, как качество припоя, наличие дефектов и прочность паяного соединения.

Для более точной оценки качества паяного соединения вводится понятие системы уравнений, поскольку камера жидкостного ракетного двигателя представляет собой сложную конструкцию.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = \frac{S_{\Delta_1}}{S_{\Sigma_1}}; \\ K_2 = \frac{S_{\Delta_2}}{S_{\Sigma_2}}; \\ K_3 = \frac{S_{\Delta_3}}{S_{\Sigma_3}}; \\ K_4 = \frac{S_{\Delta_4}}{S_{\Sigma_4}}; \end{array} \right.,$$

где

$$K_1 = \frac{S_{\Delta_1}}{S_{\Sigma_1}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_1 = \frac{S_{\Delta_1}}{S_{\Sigma_1}}; \\ K_{1i} = \frac{S_{\Delta_{1i}}}{S_{\Sigma_{1i}}}; \end{array} \right. \quad K_{n-1} = \frac{S_{\Delta_{n-1}}}{S_{\Sigma_{n-1}}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_{n-1} = \frac{S_{\Delta_{n-1}}}{S_{\Sigma_{n-1}}}; \\ K_{(n-1)i} = \frac{S_{\Delta_{(n-1)i}}}{S_{\Sigma_{(n-1)i}}}; \end{array} \right. \quad K_n = \frac{S_{\Delta_n}}{S_{\Sigma_n}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_n = \frac{S_{\Delta_n}}{S_{\Sigma_n}}; \\ K_{ni} = \frac{S_{\Delta_{ni}}}{S_{\Sigma_{ni}}}; \end{array} \right.$$

$S_{\Delta_1}, S_{\Delta_2}, S_{\Delta_3}, S_{\Delta_4}$ – площадь дефекта; $S_{\Sigma_1}, S_{\Sigma_2}, S_{\Sigma_3}, S_{\Sigma_4}$ – площадь контролируемого ребра в исследуемой области; $S_{\Delta_{1i}}, S_{\Delta_{(n-1)i}}, \dots, S_{\Delta_{ni}}$ – суммарная площадь дефектов на одном ребре; $S_{\Sigma_{1i}}, S_{\Sigma_{(n-1)i}}, \dots, S_{\Sigma_{ni}}$ – суммарная площадь ребер в исследуемой области.

Заключение

Разработанный метод поиска дефектов типа «неспай» и «частичный неспай» в паяных соединениях позволяет их обнаруживать у сопел камер ЖРД с эффективной площадью раскрытия порядка 1 мм², а также определять места расположения дефектов.

В ходе проведения исследований:

- получены модели распространения ультразвуковых волн в паяных соединениях;
- определено влияние усталостного разрушения на материал;
- определены основные параметры контроля качества паяных соединений: время и амплитудно-частотные характеристики.

Полученные результаты проекта можно использовать в области неразрушающего контроля паяных соединений в авиаракетостроении на различных стадиях производства: в процессе изготовления, в ходе испытаний и в процессе эксплуатации.

Публикации

1. Астрединова Н.В. Производственный контроль качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2012. С.122–124.
2. Астрединова Н.В., Баринов А.В. Неразрушающий метод контроля паяных соединений с применением метода лазерно-ультразвуковой дефектоскопии // XLII Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2013. С. 97–100.
3. Астрединова Н.В., Сергеев Д.С. Методика контроля качества паяных соединений камер ЖРД с применением метода лазерно-ультразвуковой диагностики // Сборник трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2013. С. 14–18.
4. Сергеев Д.С., Астрединова Н.В., Баринов А.В. Разработка автоматизированного метода контроля качества паяных соединений изделий ракетно-космической техники // Сборник трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2013. С. 150–153.
5. Астрединова Н.В., Баринов А.В., Сергеев Д.С. Возможность применения лазерно-ультразвуковой диагностики для контроля качества паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 3. С. 83–88.
6. Астрединова Н.В., Сергеев Д.С. Автоматизированный контроль качества паяных соединений изделий ракетно-космической техники // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1 (63). С. 51–52.
7. Сергеев Д.С., Федоров А.В., Астрединова Н.В., Баринов А.В. Автоматизированный лазерно-ультразвуковой метод контроля качества паяных соединений сопел камер жидкостных ракетных двигателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 139–149.

Литература

1. Рахманин В.Ф., Сагалович В.В. Разработка технологии пайки камер сгорания отечественных ЖРД // Двигатель. 2009. №1 (61). С. 34–37.
2. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов первого и второго уровней квалификации. М., 2006. – 208 с.
3. Карабутов А.А. и др. Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука // Акустический журнал. 1991. Т. 37. № 2. С. 311.
4. Карабутов А.А. и др. Измерение оптических характеристик рассеивающих сред оптико-акустическим методом // Квантовая электроника. 1999. Т. 29. № 3. С. 215.
5. Карабутов А.А. и др. Распространение широкополосных акустических сигналов в однонаправленных волокнистых композитах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1997. № 5. С. 47.

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



Буланова Нина Сергеевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: ninokfox@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ МУТАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМАХ И ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ПОИСКЕ

Н.С. Буланова

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

При создании эффективных алгоритмов часто используются адаптивные методы выбора различных поисковых эвристик. Цель проекта – разработка адаптивного метода выбора операторов мутации искусственных иммунных систем и локального поиска. Разработанный метод должен быть эффективен на вычислительном бюджете ограниченного размера и достигать оптимума задач в лучших временных пределах, чем у аналогов.

В современной науке существует направление в развитии систем искусственного интеллекта, называемое эволюционными вычислениями. В нем присутствуют несколько подходов, основанных на природных принципах эволюции, например эволюционные алгоритмы (ЭА), используемые для решения задач оптимизации [1]. Во время работы эволюционного алгоритма к особям применяются операторы мутации и скрещивания. Потом производится процесс селекции особей наиболее близких к решению задачи, а именно тех, у которых значение функции приспособленности (ФП) наибольшее. Далее эволюционный процесс повторяется до выполнения критерия останова – нахождения оптимума задачи. Данная схема является общей для большинства подходов эволюционных вычислений.

Другим подходом эволюционных вычислений являются искусственные иммунные системы (ИИС), основывающиеся на использовании моделей и характеристик естественной иммунной системы. Наибольший интерес в этой работе представляют алгоритмы клонального отбора, так как используются они в основном для решения задач оптимизации и распознавания образов [2]. В исследовании ИИС-алгоритмы сочетаются с алгоритмами локального поиска. Главное отличие алгоритмов ИИС от алгоритмов локального поиска в том, что применяющиеся в них мутации производят большие изменения в особи.

Разработка и анализ методов, объединяющих различные операторы мутации в одном алгоритме, актуальная на сегодняшний день задача. Например, в меметических алгоритмах сочетаются алгоритмы локального поиска и эволюционные [3]. Другим методом адаптивного выбора между несколькими операторами мутации является обучение с подкреплением [4]. В этом подходе агент обучения принимает набор возможных операторов в качестве входных данных и затем в процессе оптимизации обучается тому, какой из операторов эффективен для рассматриваемой задачи на текущем этапе оптимизации. Объединение преимуществ различных алгоритмов осуществляется также с помощью гибридизации. Этот метод заключается в использовании вероятностной функции при выборе одного из возможных операторов мутации в гибридном алгоритме. В работе [5] гибридизация служит для объединения операторов мутации искусственных иммунных систем и локального поиска в одном алгоритме. Полученный этим методом алгоритм может эффективно выполнять задачи решаемые хотя бы одним из объединяемых алгоритмов. Однако данный метод не является адаптивным, так как выбор между операторами мутации производится

с фиксированной вероятностью, то есть не зависит от того, на каком этапе находится решение задачи.

Описание предложенного метода

В исследовании предлагается рассматривать различные задачи максимизации ФП особей. Максимальной допустимой границей значения ФП является значение оптимума задачи для особи длины n . Существуют исследования, в которых показано, что алгоритмы ИИС наиболее эффективны в начале оптимизации. Таким образом, если на каждом шаге оптимизации использовать либо алгоритмы ИИС, либо алгоритмы локального поиска, то наибольшая эффективность должна достигаться в случае, если алгоритмы ИИС чаще применяются на начальном этапе оптимизации, а алгоритмы локального поиска – в ее конце. В исследовании разработан подход, предлагающий выбирать операторы мутации ИИС и локального поиска в соответствии с функцией вероятности на основе ФП. Функция определена следующим образом:

$$fdp(y) = n \left(\frac{f_0 - f(y)}{f_{\max}} \right),$$

где f_0 и $f(y)$ – значения ФП начальной особи и текущей особи y соответственно, а f_{\max} – максимальное значение оптимизируемой функции. Ниже в листинге представлен псевдокод разработанного метода:

1. y – случайно сгенерированная особь длины n
2. $x = y$
3. $f_0 = f(y)$
4. Повтор пунктов 5-10 пока не выполнен критерий останова
5. С вероятностью $fdp(y) = n \left(\frac{f_0 - f(y)}{f_{\max}} \right)$
6. $x = Mutation1(y)$
7. ИНАЧЕ $x = Mutation2(y)$
8. ЕСЛИ $f(x) \geq f(y)$
9. $y = x$
10. КОНЕЦ ЦИКЛА

Предложенный метод позволяет создавать гибридные алгоритмы, использующие алгоритмы ИИС в начале оптимизации и алгоритмы локального поиска в конце, с помощью экспоненциальной функции вероятности выбора операторов. Названия гибридных алгоритмов формируется следующим образом: $Mutation1+Mutation2$, где $Mutation1$ и $Mutation2$ – названия используемых в гибридном алгоритме мутаций (RLS , $CLONALG$, BCA).

Экспериментальное исследование разработанного метода

В работе рассматриваются две широко применяемые в области эволюционных вычислений и искусственных иммунных систем модельные задачи $OneMax$ и $LeadingOnes$, характеризующиеся различной вычислительной сложностью [6, 7]. Пространством поиска для них являются все возможные битовые вектора длины n . Требуется максимизировать ФП. В задаче $OneMax$ функция приспособленности битового вектора – это число единичных бит в нем. В задаче $LeadingOnes$ ФП является максимальный префикс, состоящий из единиц.

В исследовании используются алгоритмы искусственных иммунных систем, такие как $Clonal Selection Algorithm (CLONALG)$ [8] и $B-Cell Algorithm (BCA)$ [9], и алгоритм

локального поиска *Random Local Search (RLS)*. Так как алгоритм всегда работает с единственной особью, алгоритмы могут быть сравнены по числу поколений, потребовавшихся для достижения оптимума задачи. Количество вычислений функции приспособленности ограничено сверху в 10^6 вычислений. В соответствии с различными вычислительными сложностями рассматриваемых задач для выбранных алгоритмов, было решено использовать особи длиной $n = 1000$ для задачи *OneMax* и особи длиной $n = 100$ для задачи *LeadingOnes*.

Решение поставленных задач с помощью предложенного метода начинается с определения наиболее эффективных на конкретной задаче алгоритмов ИИС для дальнейшего их объединения с локальным поиском. На рис. 1 представлен график зависимости среднего значения ФП от числа ее вычислений алгоритмами *BCA*, *CLONALG* и *RLS* на задачах *OneMax* (а) и *LeadingOnes* (б). Здесь и далее значения по осям логарифмированы по основанию 10. В Табл. 1 представлено усредненное число вычислений ФП, необходимое для решения задач *OneMax* и *LeadingOnes* алгоритмами *RLS*, *BCA* и *CLONALG* и его стандартное отклонение. В Таблице прочерками показана ситуация, при которой алгоритму требовалось более чем 10^6 вычислений ФП для решения задачи.

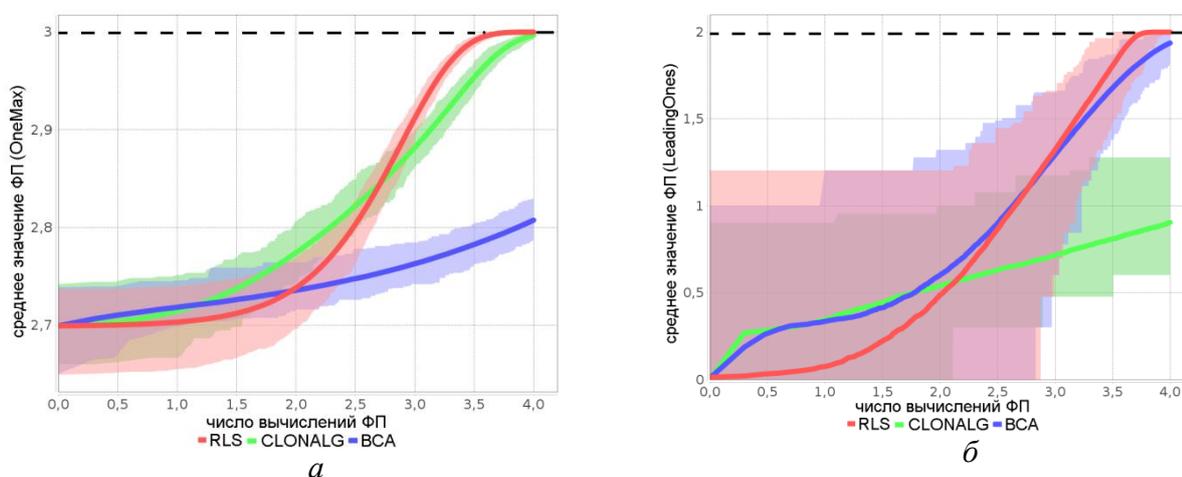


Рис. 1. Зависимость среднего значения ФП от числа ее вычислений алгоритмами *RLS*, *BCA* и *CLONALG* на задачах: а – *OneMax* и б – *LeadingOnes*

Таблица 1

Усредненное число вычислений ФП, необходимое для решения задач *OneMax* и *LeadingOnes* алгоритмами *RLS*, *BCA* и *CLONALG*, и его стандартное отклонение

Алгоритм	OneMax		LeadingOnes	
	Число вычислений ФП	Отклонение	Число вычислений ФП	Отклонение
RLS	6760	1270	5010	889
CLONALG	16800	3380	623000	173000
BCA	-	-	26400	11200

На основании представленных результатов предполагается, что при решении задачи *OneMax* предложенный метод наиболее эффективен, если делает выбор между операторами мутации из алгоритмов *RLS* и *CLONALG*, в то время как для *LeadingOnes* вместо *CLONALG* требуется использовать оператор мутации из алгоритма *BCA*.

На рис. 2а представлен график оптимизации задачи *OneMax* алгоритмами *RL(O)*, меметическим и *CLONALG+RLS*. На первых итерациях алгоритм *CLONALG+RLS* был сравним с остальными по эффективности, но быстро превзошел их (область 1 на рис. 2а).

В конце оптимизации разработанный метод показал лучшую эффективность и достиг максимума быстрее (область 2 на рис. 2а).

На рис. 2б представлен график оптимизации задачи *LeadingOnes* алгоритмами *RL(O)*, меметическим и *BCA+RLS*. На начальном этапе разработанный алгоритм не отличался по эффективности от алгоритма обучения с подкреплением (область 1 на рис. 2б). Меметический алгоритм на основе *BCA* уступал им с самого начала. По завершении непродолжительного начального этапа разработанный метод демонстрировал более высокую скорость движения к максимуму и достиг его быстрее других (область 2 на рис. 2б).

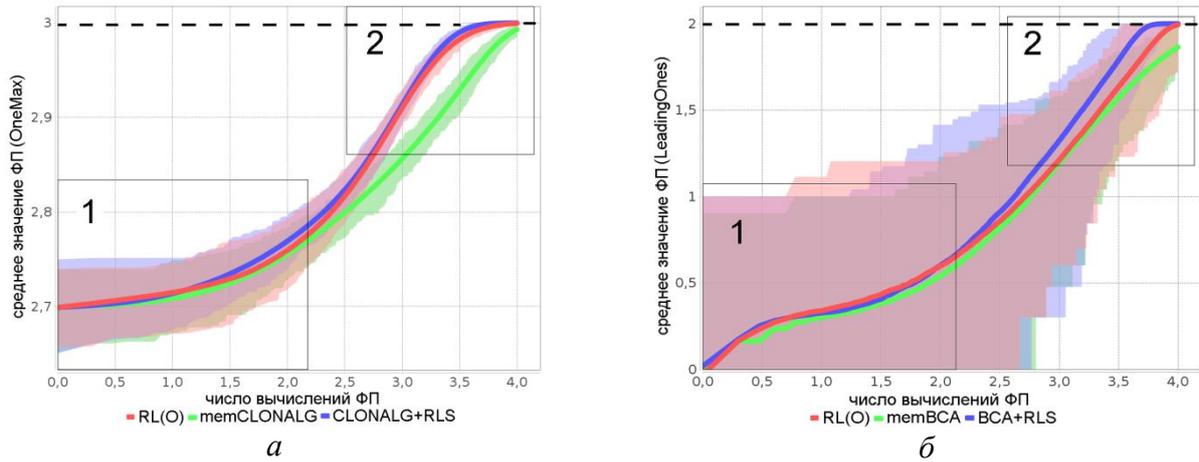


Рис. 2. Зависимость среднего значения ФП от числа ее вычислений методом обучения с подкреплением, предложенным методом и меметическими алгоритмами на задаче: а – *OneMax* и б – *LeadingOnes*

Таблица 2

Усредненное число вычислений ФП для решения задач *OneMax* и *LeadingOnes* и его стандартное отклонение

Описание метода		OneMax		LeadingOnes	
Метод	Операторы	Число вычислений ФП	Отклонение	Число вычислений ФП	Отклонение
RL(O)	RLS, BCA, CLONALG	11431	2291	8158	1532
Proposed method	BCA, RLS	7477	1311	5208	907
	CLONALG, RLS	6911	1319	7582	2963
Memetic	BCA, RLS	-	-	38329	13385
	CLONALG, RLS	19066	3497	1116024	344107

Можно наблюдать, что предложенный метод является лучшим среди рассматриваемых. Подход обучения с подкреплением уступает ему, так как требует времени на определение того, что эффективность оператора мутации изменилась (итерации алгоритма = вычисления ФП). Меметические же алгоритмы всегда применяют оператор мутации ИИС, который эффективен только в начале оптимизации, что объясняет наихудшую их эффективность.

В Табл. 2 представлено усредненное число вычислений ФП и его стандартное отклонение на задачах *OneMax* и *LeadingOnes*. Приведены результаты для подхода обучения с подкреплением (*RL(O)*), предложенного метода (*Proposed method*) и меметических алгоритмов (*Memetic*) с различными конфигурациями операторов. Из таблицы видно, что

лучшим для оптимизации задач *OneMax* и *LeadingOnes* является предложенный метод, объединяющий локальный поиск с *CLONALG* и *BCA* соответственно. Для всех возможных пар алгоритмов был применен непарный тест Вилкоксона, показавший статистическую значимость результатов.

Заключение

Предложен метод адаптивного выбора операторов мутации ИИС и локального поиска. В предложенном методе используется функция выбора операторов мутации, которая изменяется в зависимости от значения ФП особи. Проведено сравнение эффективности предложенного метода с существующими: обучения с подкреплением, меметическими алгоритмами и гибридизацией с константной вероятностной функцией.

Показано, что методу обучения с подкреплением требуется дополнительное время для переобучения, а меметические алгоритмы используют операторы ИИС, когда они мешают оптимизации. Экспериментально подтверждено, что оператор мутации ИИС эффективен только в начале оптимизации, а в дальнейшем частоту его применения следует резко уменьшить.

На основе предложенного метода были разработаны алгоритмы, использующие функцию, зависящую от ФП для выбора между операторами мутации ИИС и локальным поиском. Экспериментальное исследование показало, что на всех этапах оптимизации задач *OneMax* и *LeadingOnes*, разработанные алгоритмы не уступают или лучше по эффективности, чем меметические алгоритмы и алгоритмы обучения с подкреплением. Все полученные результаты являются статистически значимыми, что подтверждается с помощью теста Вилкоксона.

Публикации

1. *Bulanova N.S., Buzdalova A.S., Buzdalov M.V.* Fitness-dependent hybridization of clonal selection algorithm and random local search // Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'16). 2016. P. 5–6.
2. *Bulanova N.S., Buzdalova A.S., Parfenov V.G.* Comparative study of methods for combining artificial immune systems and random local search // Proceedings of the 22nd International Conference on Soft Computing MENDEL. 2016. P. 87–94.
3. *Буланова Н.С., Буздalова А.С., Буздalов М.В.* Гибридизация искусственных иммунных систем и эволюционных алгоритмов // СПИСОК-2016: материалы 6-й Всероссийской научной конференции по проблемам информатики. СПб., 2016. С. 262–267.

Литература

1. *Mitchell M.* An introduction to genetic algorithms. Cambridge, 1996. – 221 p.
2. *Timmis J., Neal M. J.* A resource limited artificial immune system for data analysis // Knowledge-Based Systems. 2001. Vol. 14. No 3–4. P. 121–130.
3. *Neri F. et al.* Handbook of memetic algorithms. Berlin, 2012. – 370 p.
4. *Sutton R.S., Barto A.G.* Reinforcement learning: an introduction. Cambridge, 1998. – 332 p.
5. *Corus D.* On easiest functions for somatic contiguous hypermutations and standard bit mutations // Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'15). 2015. P. 1399–1406.
6. *Bottcher S. et al.* Optimal fixed and adaptive mutation rates for the LeadingOnes problem // Parallel Problem Solving from Nature / ed. by R. Schaefer et al. Berlin, 2010. P. 1–10.
7. *Oliveto P.S. et al.* Time complexity of evolutionary algorithms for combinatorial optimization: a decade of results // International Journal of Automation and Computing. 2007. Vol. 4. No 3. P. 281–293.
8. *de Castro L., Zuben F.* Learning and optimization using the clonal selection principle // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. No 3. P. 239–251.

9. Kelsey J., Timmis J. Immune inspired somatic contiguous hypermutation for function optimisation // Genetic and Evolutionary Computation Conference – GECCO 2003. Proceedings. Part I. 2003. P. 207–218.



Ватьян Александра Сергеевна
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра интеллектуальных технологий в гуманитарной сфере
E-mail: alexvatyan@gmail.com

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

А.С. Ватьян

Научный руководитель – доцент Н.Ф. Гусарова

В последнее время онтологии как метод представления информации стали актуальным предметом исследования в области искусственного интеллекта. Они используются при разработке различных информационных систем и представляются в качестве результата деятельности ученых. На сегодняшний день медицина – одна из сфер, где они применяются наиболее широко.

Особенность исследований по медицинской проблематике заключается в том, что, применяя одни и те же методы и алгоритмы, различные специалисты получают разные, зачастую противоположные результаты. В то же время большинство типовых ИТ-систем хранения не может содержать, хранить и обрабатывать данные, которые представляют собой комбинацию стандартных медицинских знаний и знаний, полученных эмпирически. Поэтому крайне важно анализировать эти противоречия и отмечать атрибуты, которые могут влиять на данные.

Типовой формой хранения сложно структурированных, в том числе медицинских, данных являются онтологии. В процессе их разработки используется множество языков, методологий и инструментов [1]. Современные медицинские онтологии в большинстве случаев базируются на четко структурированной системе заболеваний и включают описывающие эти заболевания термины. Однако, согласно последним исследованиям, все больший объем медицинской информации составляют данные, полученные эмпирически из различных клинических исследований и не описываемые общепринятой терминологией, их также нужно хранить для повторного их использования при формализации знаний о текущих проблемах.

Для решения этой задачи в статье описывается подход с применением онтологий с особой техникой хранения текущего контента: в дополнение к определению основных медицинских объектов на уровне базы знаний используются онтологии для хранения, организации и описания противоречивых результатов [2]. Таким образом, разрабатываемая система представления знаний способна не только упростить интерпретирование клинических данных, но и повысить качество принятия решений в случае, когда имеют место противоречия в одинаковых исследованиях.

В качестве предметной области для реализации этой задачи было выбрано создание онтологии рака легких, которая содержит основные понятия этой болезни, а также различные клинические случаи и медицинские практики. Разработанная онтология включает знания, полученные разными методами, а также с использованием различных алгоритмов [3]. В основе дальнейшего описания структуры онтологии лежат экспериментальные исследования рака легких по методике анализа уровня экспрессии генов.

Для структурирования медицинских данных предлагается онтологическая модель (рис. 1), выполненная как метаонтология. В ней представлена структура медицинских материалов, состоящая из трех основных частей: первая часть содержит онтологию рака легких, вторая – классификацию методов и алгоритмов для анализа данных, третья – информацию о текущем исследовании.

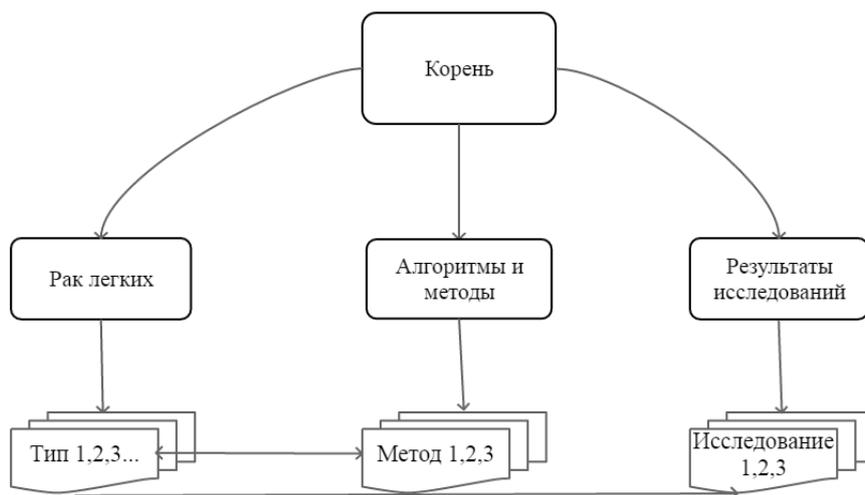


Рис. 1. Предлагаемая метаонтология

Открытая часть левой ветви болезни (рис. 2) представляет собой стандартную онтологическую структуру с данными, которые с помощью специальных связей легко соотнести с различными типами рака легких и их характеристиками. Ученый может использовать предложенную модель как основную или создавать собственную.

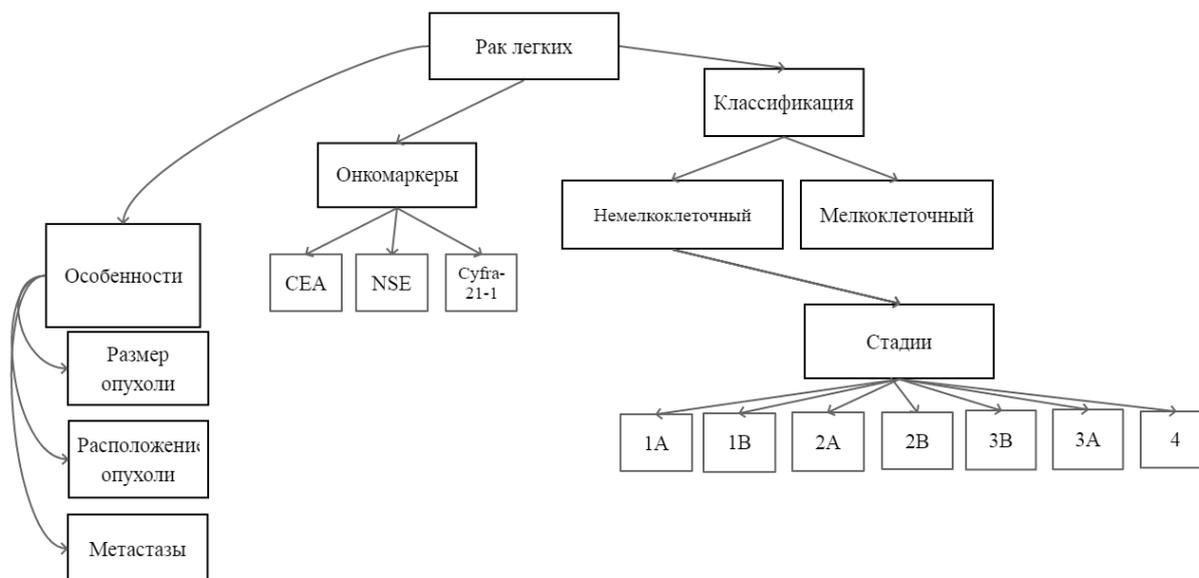


Рис. 2. Ветвь метаонтологии рака легких

На рис. 3 представлена структура, раскрывающая ветвь «Алгоритмы и методы» метаонтологии. На рисунке представлены фрагменты, отражающие различные варианты используемых для классификации болезней алгоритмов машинного обучения со своими идентификационными номерами (*ID*), а также их возможные признаки (в качестве примера приведено характерное деление алгоритмов на линейные и нелинейные).

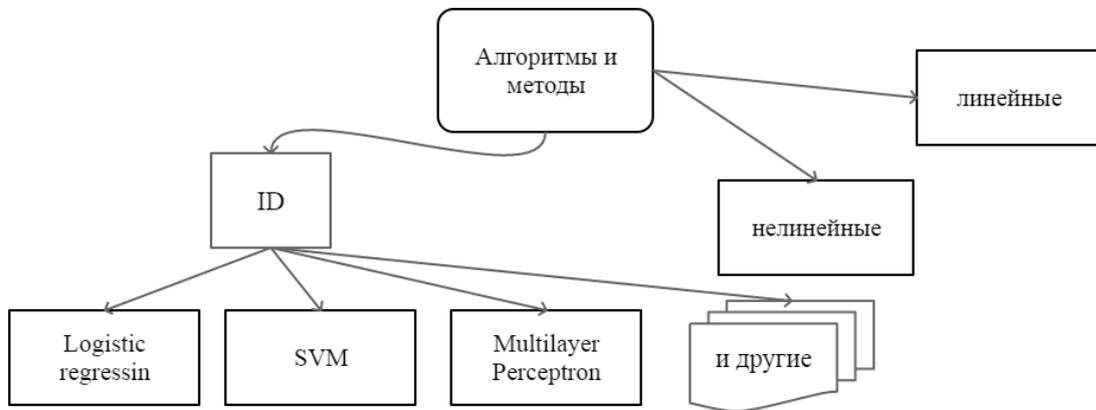


Рис. 3. Ветвь «Алгоритмы и методы» метаонтологии

Результаты исследований можно представить в виде структуры, изображенной на рис. 4. Каждый информационный объект отображает результат исследования, выполненного с применением конкретного алгоритма, определяемого своим *ID* и набором признаков (например, линейные/нелинейные), и одновременно через общие метаданные (рис. 1) может быть связан с другими информационными объектами. Таким образом, исследователь имеет возможность выявить и выделить сходство и различие в разнообразных результатах и наборах данных. Для реализации и тестирования предложенного подхода была создана онтология на базе движка *wiki*, с применением платформы *MediaWiki* с открытым исходным кодом. Объекты разработанной онтологии представлены в виде веб-шаблонов, которые связаны друг с другом различными типами отношений, в ней также используется дополнение *SemanticMediaWiki*.

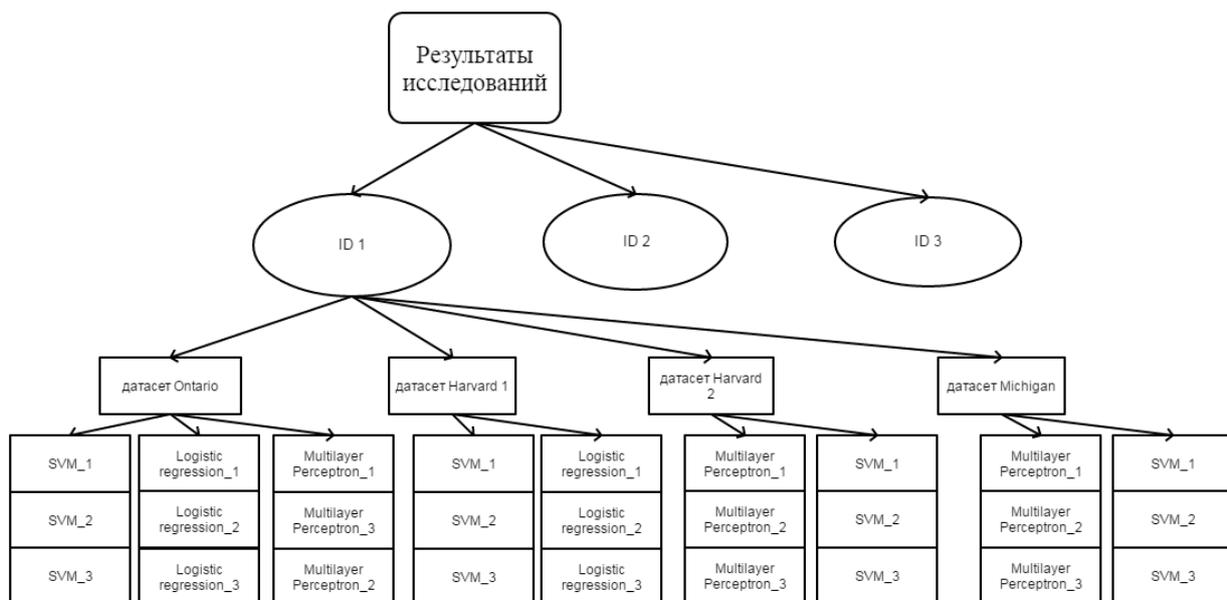


Рис. 4. Ветвь метаонтологии с результатами исследований

В состав веб-шаблона входит информация о клинических исследованиях, включающая основную информацию о содержании болезни, а также специальные метаданные. Каждый Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

веб-шаблон представляет собой структурированную базовую информацию об объекте исследования и его компонентах, например типе рака, методах его диагностики и т. д. Метаданные, применяемые в веб-шаблонах, тоже содержат информацию о типах рака и его свойствах. Они связаны со всеми остальными веб-шаблонами, в которых хранятся результаты экспериментальных исследований рака легких, основанные на применении различных алгоритмов машинного обучения, таких как логистическая регрессия, метод опорных векторов, многослойный перцептрон и прочих.

При этом каждый из этих веб-шаблонов, содержащий результат конкретного исследования, связан с теми веб-шаблонами, которые хранят данные, полученные в процессе аналогичных исследований. За счет применения метаданных появляется возможность выделять, а также быстро и эффективно находить интересующую информацию по различным аспектам исследования, например атрибутам, общей оценке, метрикам, комментариям и т. д., в том числе выявлять, выделять, сохранять и обмениваться общими и противоречивыми признаками, полученными в процессе клинической практики.

Для добавления нового документа или внесения изменений в структуру онтологии достаточно изменить нужную информацию в метаданных и связать новый веб-шаблон с остальными. Организованная таким образом семантическая веб-структура позволяет пользователю искать необходимую информацию не только по всей структуре системы, но и по совпадению текстового запроса, а также, что является наиболее важным и актуальным, создавать сложные запросы. Ученый может искать не только дочерние элементы конкретного объекта, но также возвращать их родителей и искать по связанным документам, таким как ссылки, метаданные, формы и информация о прикрепленных файлах.

Опишем применение разработанной онтологии рака легких на примере реальных экспериментальных данных, полученных при изучении возможностей диагностики рака легких на основе метода экспрессии генов.

Для проведения исследования были отобраны комплекты данных из открытых источников: Институт рака Онтарио, Мичигана, Даны-Фарбер и других. На каждом из них были применены различные алгоритмы классификации. Основной особенностью сравнения было разделение алгоритмов на линейные и нелинейные. Для расчетов были выбраны следующие метрики: F -мера, показатель AUC , ROC curve, MCC , которые используются во многих исследованиях. Для отбора признаков, тренировки классификаторов и расчетов использовалось ПО *Weka 3*.

В ходе исследования было выявлено, что одинаковые алгоритмы с различными комбинациями атрибутов отбора признаков показали непостоянные результаты. Например, ROC -кривые одних и тех же классификаторов, примененных для набора данных Института рака Онтарио, но с разными настройками, отличаются друг от друга. В качестве классификатора использовался метод опорных векторов, число выбранных атрибутов в первом эксперименте составляло 21, что дало более высокую производительность по сравнению со вторым экспериментом, где были отобраны все атрибуты. В результате в первом эксперименте F -мера составила 0,792, а во втором – 0,671. Еще один интересный результат был получен на наборе данных Мичиганского института: даже при применении двух различных классификаторов (метод опорных векторов (SVM) и многослойный перцептрон ($Multilayer\ perception$), рис. 3) метрики изменились незначительно.

Результаты эксперимента при сохранении в разработанной системе помечались специальными метаданными: тип набора данных, число атрибутов, метрики, общая оценка, специальные комментарии и другие. Создавая реальные системы хранения, применимые для дальнейшего использования, можно обозначать начальные условия, добавлять их в метаданные, разделять атрибуты на четкие и нечеткие, а также помечать стабильные и нестабильные признаки. Например, пользователь может создавать особый запрос для получения результатов на основе конкретного набора данных. Для поиска противоречивых результатов он может ввести `[[Ontario :: results :: SVM :: F-measure]]`, и система выдаст все

страницы с примененным к набору данных института Онтарио классификатором на базе метода опорных векторов, а также с выделением F-меры в различных экспериментах.

Для поиска тех исследований, которые были помечены исследователем как содержащие неудовлетворительные показатели с использованием нелинейных алгоритмов, он может ввести `[[Dataset? :: results :: non-linear :: overallevaluation=0]]`, и система выдаст все страницы с отмеченными метаданными «общая оценка 0».

Кроме того, в *MediaWiki* встроена система контроля версий, в которой хранится информация о пользователе, внесшем изменения в документы и шаблоны и о точном их времени (позволяет все отслеживать). Это дает возможность пользователю выявлять при обработке конкретного запроса противоречивые результаты. Например, он может искать все параметры, где рассмотрен набор данных Онтарио, используемые в течение прошлого года, и результаты применения этих параметров, отличающиеся друг от друга.

Заключение

В результате выполнения данного проекта реализована система для хранения информации по медицинской диагностике, основанная на онтологиях. Она основана на определенном способе хранения медицинского контента, который позволяет пользователю не только хранить общепринятую для медицинской области информацию, но и предлагает решение проблемы хранения результатов текущих исследований. В процессе заполнения система накапливает достаточно сведений о процессе исследования и может быть использована для улучшения и упрощения рабочего процесса медиков и исследователей при подготовке клинических данных. Системный поиск позволяет пользователю узнать о необходимых результатах применения различных алгоритмов и методов к разным наборам данных, с учетом требований к конкретным признакам, которые были выбраны для них.

Разработанные методы могут найти широкое применение в сфере медицины для оптимизации распознавания изображений компьютерной томографии, классификации легочных узлов и обнаружения рака легких на ранних стадиях. Они позволяют значительно облегчить работу радиологов и минимизировать ошибки в распознавании. Применение разработанной системы позволит значительно сократить временные затраты и облегчить коммуникацию между исследователями и врачами-практиками.

Публикации

1. *Vatian A.S., Gusarova N.F., Dobrenko N.V., Artemova G.O., Filatov A.S.* An ontology-based system for storing the research results on medical diagnostics // *Communications in Computer and Information Science*. 2017. Vol. 745. P. 365–373.
2. *Ватьян А.С., Лобанцев А.А., Гусарова Н.Ф., Добренко Н.В., Артемова Г.О.* Онтологическая система для хранения текущих результатов медицинской диагностики // *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2017 (в печати).
3. *Artemova G.O., Gusarova N.F., Dobrenko N.V., Trofimov V.A., Vatian A.S.* Analysis of the classification methods of cancer types by computer tomography images // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. Vol. 674. P. 526–531.

Литература

1. *Брук Н.* Медицинские онтологии для представления текстовой и графической информации // *Studia Universitatis Moldaviae. Seria “Științe Exacte și Economice”*. 2013. № 2. С. 33–38.
2. *Андреев М.В. и др.* Применение технологий семантических баз знаний в популяционном скрининге онкологических // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015): труды Международной научно-технической конференции СГАУ*. Т. 1. Самара, 2015. С. 324–329.

3. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б. Онтологии и их практическое применение в системах, основанных на знаниях // Знания – Онтология – Теория: материалы Всероссийской конференции с международным участием (ЗОНТ 2011). Т. 1. Новосибирск, 2011. С. 132–141.



Вишератин Александр Александрович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра высокопроизводительных вычислений
E-mail: alexvish91@gmail.com

МНОГОУРОВНЕВОЕ МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕФОННЫХ ЗВОНКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ

А.А. Вишератин

Научный руководитель – доктор технических наук А.В. Бухановский

В современном мире общение между людьми имеет исключительную важность, поскольку оно лежит в основе практически всех социальных, экономических и политических явлений, начиная от налаживания межличностных связей и заканчивая политическими переговорами на высоком уровне. Именно поэтому исследования в сфере психологических, лингвистических и социальных аспектов общения год от года становятся все более актуальными. Научные работы, посвященные изучению поведенческих аспектов взаимодействия между людьми в различных ситуациях, находят широкий отклик не только в научном сообществе, но и в практической сфере при проектировании многолюдных сооружений (торговых центров, стадионов, концертных площадок), а также в планировании и проведении массовых мероприятий (спортивных соревнований, концертов, фестивалей).

Однако для проведения подобных исследований зачастую требуется большой набор различных данных, таких как траектории движения людей в пространстве и времени, записи об их взаимодействии и реакции на события, происходящие вокруг. Подобная информация может быть получена только в результате масштабного анализа, целенаправленно проведенного на каком-либо массовом мероприятии. Но следует понимать, что данные, полученные, например, на музыкальном концерте, скорее всего, будут абсолютно неприменимы, например, к художественным выставкам, невзирая на сходства занимаемых ими площадей и количественный состав участников. В связи с этим появляется потребность в максимально реалистичном воспроизведении различных социальных процессов и событий, иногда очень затратных, а зачастую и невозможных для воспроизведения в реальности.

Чрезвычайную эффективность в этой области показало агентное моделирование, в основе которого лежит описание набора правил функционирования отдельных моделируемых индивидов (агентов), а также правил их взаимодействия с окружающим миром и другими агентами. Полноценное описание механизмов работы в сочетании с научно обоснованными принципами построения модели во многих случаях позволяет добиться довольно точного соответствия процессов, происходящих в модели, процессам в реальном мире. После того, как модель настроена и проверена на настоящих данных, она может быть с определенными допущениями использована для воспроизведения похожих процессов, но

в других масштабах – тысячи агентов вместо сотен или пространство площадью квадратный километр вместо ста гектаров. Бывают случаи, когда моделируемые агенты диверсифицированы настолько, что в сходных ситуациях могут показывать абсолютно различное поведение. Например, обычные люди, которые посещают мероприятие, осматривают его и общаются с узким кругом своих знакомых, и организаторы, которые следят за мероприятием и общаются с широким кругом лиц, чтобы контролировать происходящее, а также вовремя получать отзывы. В таких ситуациях на этапе анализа данных и проектирования модели выделяются классы агентов и для каждого из них описываются свои правила функционирования. Такие модели называются мультиагентными.

Общение по телефону на протяжении многих лет является одним из самых важных способов связи. Даже с развитием интернета и взрывным ростом числа сообщений, передаваемых с его помощью, звонки не теряют своей актуальности в связи с тем, что они являются единственным способом удаленной исключительно вербальной коммуникации. В отличие от электронной почты или социальных сетей, где после отправки сообщения пользователь вынужден ждать ответ произвольное количество времени и не имеет гарантии того, что адресат прочитает и поймет сообщение, звонки позволяют максимально быстро установить связь между пользователями и гарантировано передать информацию. Именно поэтому исследование взаимодействия людей с помощью звонков крайне актуально, особенно в контексте экстремальных ситуаций, таких как наводнения или пожары.

В настоящее время большое число работ посвящено изучению различных характеристик мобильных сетей как набора узлов, которые взаимодействуют между собой через беспроводные каналы [1, 2]. В таких сетях агенты движутся в пространстве, где их доступность и способность к передаче данных сильно зависит от местоположения относительно других агентов. В работе [3] авторы исследуют применимость эпидемиологических моделей для моделирования проникновения информации в мобильных сетях. Описанная модель была использована для изучения влияния плотности расположения устройств на передачу информации и для поиска возможных путей максимизации передачи. Данная работа показывает, что эпидемиологические модели могут быть эффективно использованы для моделирования распространения информации в мобильных сетях.

Мобильная сеть также может быть рассмотрена как социальная, и в связи с этим важно понимать сходства и различия между ними. В работе [4] авторы исследовали процессы распространения информации в двух социальных сетях – *Digg* и *Twitter*. Несмотря на то, что принципы их работы отличаются, шаблоны пользовательского взаимодействия и распространения информации очень похожи. Методы исследования социальных сетей, описанные в этой статье, могут быть в полной мере использованы при анализе других сетей, например мобильных. Исследование экспериментально полученных данных о графах звонков [5] показывает, что количество входящих и исходящих звонков подчиняется степенному закону, когда небольшая группа пользователей демонстрирует высокую активность, а все остальные пользователи совершают совсем небольшое число звонков.

На сегодняшний день активно ведется разработка различных подходов к моделированию коммуникационных сетей. В работе [6] авторы предлагают методику генерации растущей комплексной сети, воспроизводящей поведение узкого круга знакомых, где все агенты связаны друг с другом. Процесс совершения звонков для новых агентов подчиняется степенному распределению – чем больше звонков было совершено пользователем, тем выше его приоритет. Такой подход дает базовую идею приоритизации агентов для распределения вероятности звонка, однако он требует серьезной доработки при создании комплексной модели распространения информации.

Помимо моделирования сетей, большую важность имеет исследование поведенческих характеристик пользователей мобильных сетей. В работе [7] был проведен анализ записей звонков работников и студентов Массачусетского технологического института с целью

выявления особенностей их поведения, используя временные интервалы активности людей. Авторы предположили, что ежедневная активность офисного работника и студента значительно отличается, хотя бы потому, что у студентов зачастую гораздо больше свободного времени и они начинают свой день значительно позже тех, кто работает в офисе. Поскольку у исследователей была информация о местоположении людей, результаты, полученные при помощи разработанной ими модели, были верифицированы и показали, что модель позволяет с высокой точностью определить, к какому типу относится пользователь.

Цель работы – исследование поведенческих характеристик пользователей в мобильной сети на основании графов звонков и распространения информации, которые являются входными данными для анализа и получены в результате разработанной ранее многоуровневой мультиагентной модели.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи.

1. Исследована зависимость классов агентов от характеристик соответствующих им узлов в графе звонков. К таким характеристикам относятся, например, общее число звонков и средняя их продолжительность.

2. Исследована зависимость между характеристиками взаимодействия узлов в графе звонков и типом связи (сильная, слабая) соответствующих им агентов модели.

3. Проведен анализ устойчивости сети распространения информации посредством удаления из сети контактов агентов разных типов, а также произведен сравнительный анализ влияния типа агента на скорость распространения информации.

Методы и подходы, которые были применены при выполнении проекта:

- для генерации графов звонков и распространения информации была использована разработанная ранее многоуровневая мультиагентная модель, которая позволяет по заданным параметрам и типам агентов, а также с помощью правил их поведения воспроизводить функционирование замкнутого участка мобильной сети;

- для анализа зависимостей, описанных в задачах исследования, помимо имеющихся в графах характеристик, также были использованы вычисленные параметры сети, такие как *degree centrality*, *betweenness centrality* и *closeness centrality*;

- исследование зависимостей проводилось с помощью кластерного анализа графов звонков и распространения информации посредством экспериментального определения параметров кластеризации и необходимого числа групп (кластеров);

- анализ устойчивости сети был произведен посредством удаления узлов из исходной сети контактов с последующим вычислением параметров активности и распространения информации соответствующих результирующих графов.

По тематике, близкой к данному проекту, были получены следующие предварительные результаты.

1. Проанализированы реальные данные о звонках пользователей в мобильных сетях.

2. Выделены основные типы пользователей в мобильных сетях.

3. Разработаны три уровня мультиагентной модели телефонных звонков.

К основным результатам проекта относятся:

- зависимости классов агентов от характеристик соответствующих им узлов в графе звонков;

- зависимости между характеристиками взаимодействия узлов в графе звонков и типом связи (сильная, слабая) соответствующих им агентов модели;

- зависимости влияния типа агента на скорость распространения информации.

Литература

1. Royer E.M. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks // IEEE International Conference on Communication. 2001. P. 857–861.

2. Zeadally S. et al. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges // Telecommunication Systems. 2012. Vol. 50. No 4. P. 217–241.
3. Khelil A. et al. An epidemic model for information diffusion in MANETs // Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulations of Wireless and Mobile Systems. Atlanta, 2002. P. 54–60.
4. Lerman K., Ghosh R. Information contagion: an empirical study of the spread of news on Digg and Twitter social networks // Proceedings of 4th International Conference on Weblogs and Social Media. Washington D.C., 2010. P. 90–97.
5. McDiarmid A. et al. Nodobo: detailed mobile phone usage dataset. Glasgow, 2011. – 9 p.
6. Aiello W. et al. A random graph model for massive graphs // Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on Theory of Computing. Portland, 2000. P. 171–180.
7. Vaz de Melo P.O.S. et al. Surprising patterns for the call duration distribution of mobile phone users // Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: European Conference. Proceedings. Part III. Barcelona, 2010. P. 354–369.



Галяев Павел Олегович
Факультет низкотемпературной энергетики
Кафедра криогенной техники и технологий сжиженного
природного газа
E-mail: pavel.galyaev@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ОРЕБРЕНИЯ ПРИМЫКАЮЩИХ ПОЛОСТЕЙ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

П.О. Галяев

Научный руководитель – профессор И.К. Прилуцкий

Актуальность настоящей работы определяется сложившейся тенденцией форсирования машин объемного действия по частоте вращения вала и средней скорости поршня, что позволяет снизить удельные массогабаритные показатели. Следствием такого подхода является повышение теплонагруженности машин, что чревато возникновением опасных (взрывоопасных) ситуаций и снижением эффективности их работы. Внедрение внутреннего оребрения цилиндра и примыкающих к нему полостей является одним из путей устранения отрицательного влияния указанных факторов, поскольку позволяет существенно снизить температуры газа по ступеням в тяжелых условиях эксплуатации.

Среди существующих типов компрессоров отдельную нишу занимают компрессоры с повторно-кратковременным режимом работы (рис. 1). При работе в режиме периодических пусков и остановок практически теряется только энергия, затрачиваемая на разгон механизма компрессора и ротора электродвигателя из положения покоя до номинальной скорости в начале каждого цикла. В пусковом режиме разгон компрессора до номинальной частоты вращения чаще всего протекает с одновременным повышением давления в нагнетательном трубопроводе, то есть осуществляется пуск с противодавлением. После выхода на номинальную частоту вращения за время пуска компрессор работает некоторое время до тех пор, пока давление не достигнет установленного максимума [1, 2].

Отличительной особенностью компрессоров с повторно-кратковременным режимом работы является, как правило, одноступенчатое исполнение с высоким отношением давлений в ступени ($\Pi \leq 11$, где Π – отношение конечного давления к начальному). Считается, что при $\Pi \rightarrow \max$, начальной температуре стенок цилиндра $T_{ст} = T_{окр.ср.ср.}$ и кратковременной работе компрессора температура газа в стандартной точке нагнетания ступени (СТН) $T_{нг}^*$ не должна превышать допустимой величины ($T_{нг}^* \leq 453$ К). На взгляд автора, в этих случаях из-за опасности разложения смазочных масел и образования нагаров, особенно в зоне нагнетательных клапанов, необходимо до предела снижать среднюю температуру газа в цилиндре $T_{нг.ц}$ на участке нагнетания, величина которой при $\Pi \rightarrow \max$ кратковременно (но весьма существенно) может превышать температуру газа $T_{нг}^*$, фиксируемую в ходе эксплуатации [1, 3–8].

Высокая эффективность охлаждения ступени компрессора достигается не всегда. Для этого требуются увеличенный расход охлаждающей среды через «внешнее» теплообменное оборудование или увеличенные поверхности теплообмена. Неоспоримо, эффективное охлаждение ступени гарантирует увеличение индикаторного КПД [3], безопасность работы [8, 2] и понижение металлоемкости теплообменных агрегатов [6]. Присутствуют многочисленные примеры из разных областей техники и производства, в том числе и криогенная техника, где требуются чистые, беспримесные сжатые газы. С целью обеспечения требуемого качества сжатого газа получили развитие компрессоры объемного принципа действия с бессмазочной рабочей камерой [6]. Одним из неотъемлемых критериев функционирования таких компрессоров считается необходимость обеспечения их эффективного охлаждения.

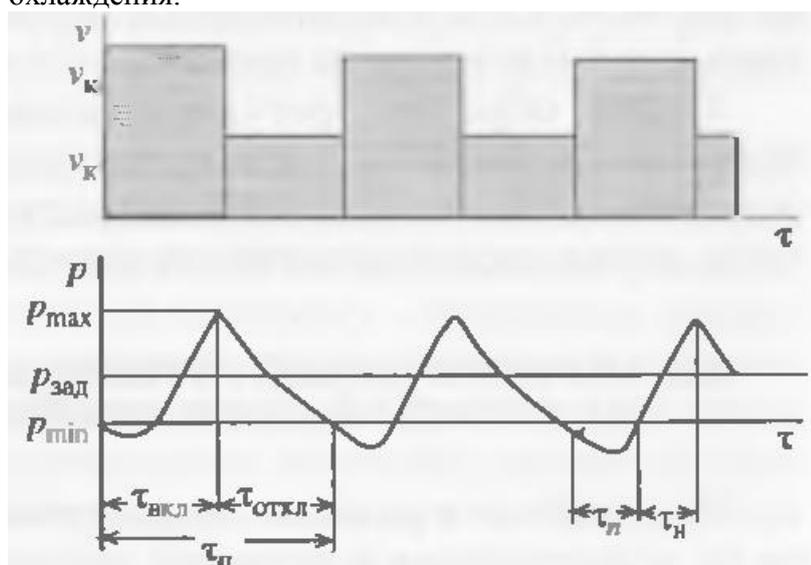


Рис. 1. Работа компрессора с периодическим пуском и остановкой

Поставленная цель достигается путем увеличения площади внутренней поверхности полости нагнетания ступени компрессора. Для этого необходимо ввести понятие коэффициента внутреннего оребрения $K_p \geq 1,0$ (отношение площади теплообменной поверхности рабочей камеры с внутренним оребрением к этой площади поверхности без оребрения). С учетом коэффициента K_p удельная площадь теплообменной поверхности цилиндра описывается зависимостью:

$$F_{m-o.уд} = F_{m-o}/m_m = 2(K_p + S_n/D_u)/(\rho_{вс}S_n),$$

где $F_{m-o.уд}$ – удельная площадь поверхности теплообмена в компрессоре, m^2 ; $F_{т.о.}^*$ – площадь поверхности теплообмена в компрессоре, m^2 ; m_m – теоретический массовый расход ступени компрессора, кг/ч; K_p – коэффициент оребрения внутренней поверхности цилиндра, S_n –

величина хода поршня, мм; $D_{ц}$ – диаметр цилиндра компрессора, мм; $\rho_{вс}$ – плотность газа на входе в цилиндр, кг/м³.

При обработке результатов численного эксперимента коэффициент подачи ступени λ и его составляющие с учетом принятых допущений в общем случае трактовались в соответствии с уравнением [2]:

$$\lambda = m / m_m = M / M_m = \lambda_o \lambda_m \lambda_o - (v_{неp} + v_{np} + v_{в.у} + v_{вл}) \approx \lambda = \lambda_o \lambda_m \lambda_o,$$

где $\lambda_o = p_1 / p_{вс}$ – коэффициент давления, $\lambda_m = T_{вс} / T_1$ – коэффициент подогрева, $\lambda_o = 1 - a(\rho_3/\rho_1 - 1)$ – объемный коэффициент, $v_{неp} = \lambda_o \lambda_m (\Delta \lambda_{o,вс} + \Delta \lambda_{o,нз})$ – коэффициент, учитывающий объемные потери, связанные с запаздыванием закрытия всасывающих и нагнетательных клапанов, уровнем интенсивности процессов теплообмена и величины газодинамических сопротивлений, M – массовый расход ступени компрессора, кг/ч; M_m – теоретический массовый расход ступени компрессора, кг/ч.

При проведении расчетного анализа ставилась задача изучения процессов, протекающих в компрессорных ступенях [9–11].

Объект исследования – ступень поршневого компрессора с линейным приводом ПК-140-450-240 (исходные данные для расчетов представлены в Табл. 1, 2); Особенности планируемого численного эксперимента:

- полость всасывания без внутреннего оребрения;
- объемы полостей всасывания и нагнетания равны объему рабочего цилиндра ступени компрессора;
- диаметр патрубков ступени выбран согласно диаметру, необходимому для обеспечения массового расхода ступени компрессора: $d_{mp} = 40$ мм.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметры	Размерность	Варианты расчета					
		Без оребрения и без учета ТО* в полостях	Без оребрения с учетом ТО только в пол. нг.**	С учетом ТО и K_p пол нг*** =1,5	С учетом ТО и K_p пол нг =2,0	С учетом ТО и K_p пол нг =2,5	С учетом ТО и K_p пол нг =3,0
Шаг расчета – $\Delta\varphi = 0,02$ градуса; число итераций $Z_{итер.} = 12$; $Z_{кл} = 3 / 2$							
D	мм	140					
S	мм	450					
V_h	м ³	0,00692					
a	-	0,06					
n	об/мин	240					
$\tau_{ц}$	с	0,25					
$F_{т-о.уд}$	м ² /кг	15,61					
$d_{тр.п.нг}$	мм	40					
$p_{вс} \rightarrow p_{нг}$	МПа	0,1 → 1,1					
$T_{вс}$	К	293					
$\sum f_{ст.п.вс} \cdot K_p$	м ²	0,137353	0,137353	0,137353	0,137353	0,137353	0,137353
$\sum f_{ст.п.нг} \cdot K_p$	м ²	0,137353	0,137353	0,206030	0,274706	0,343383	0,412059

* – теплообмен,

** – полость нагнетания,

*** – коэффициент оребрения полости нагнетания.

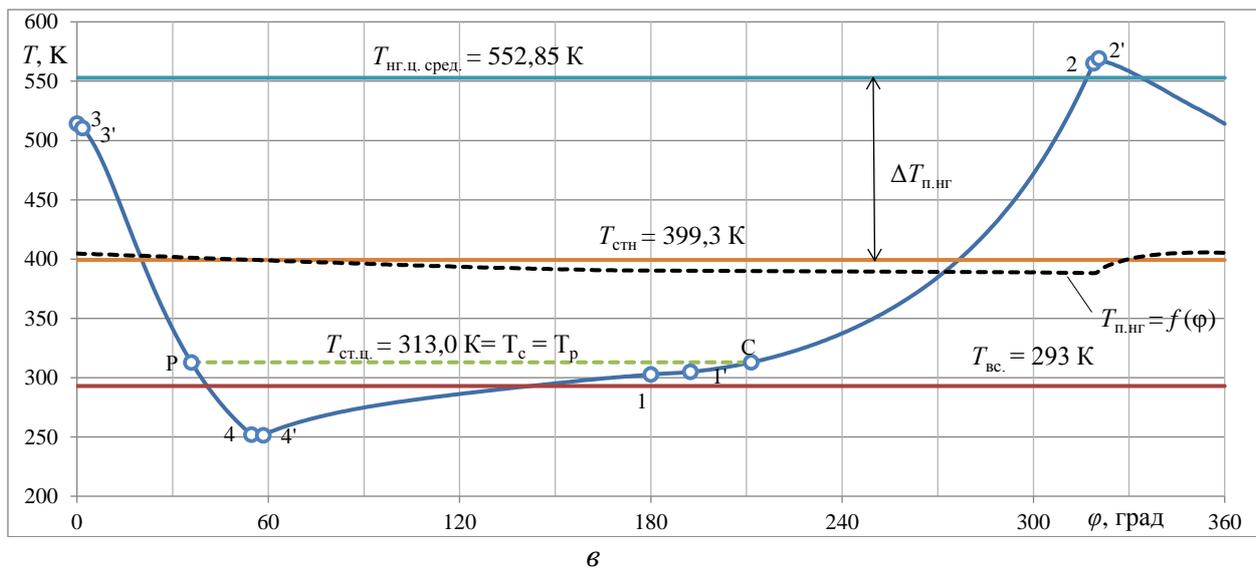
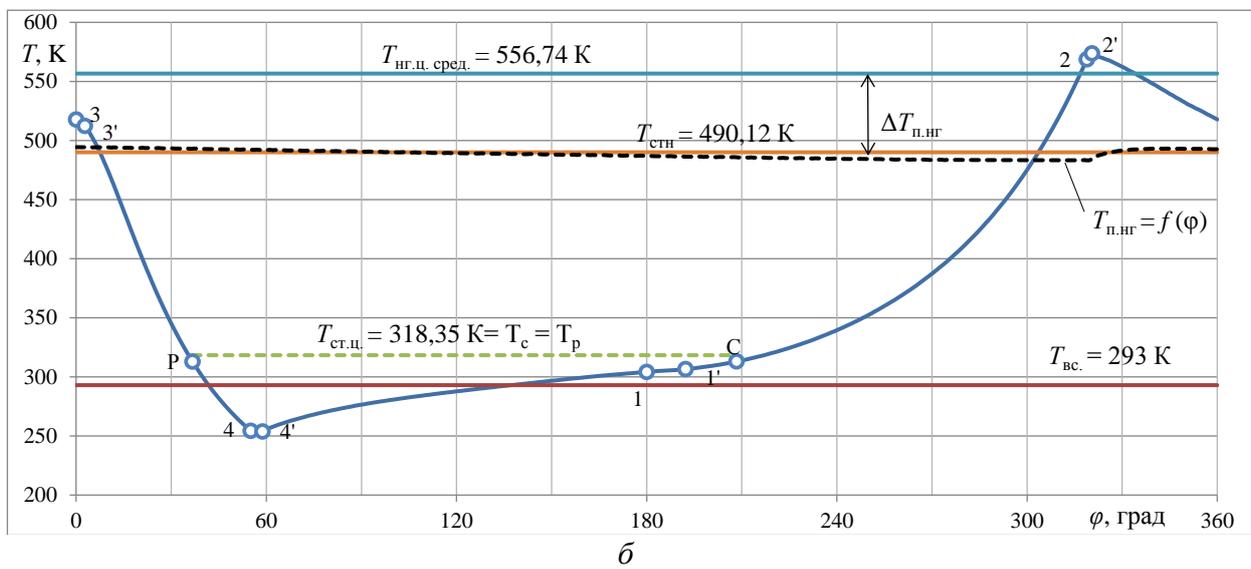
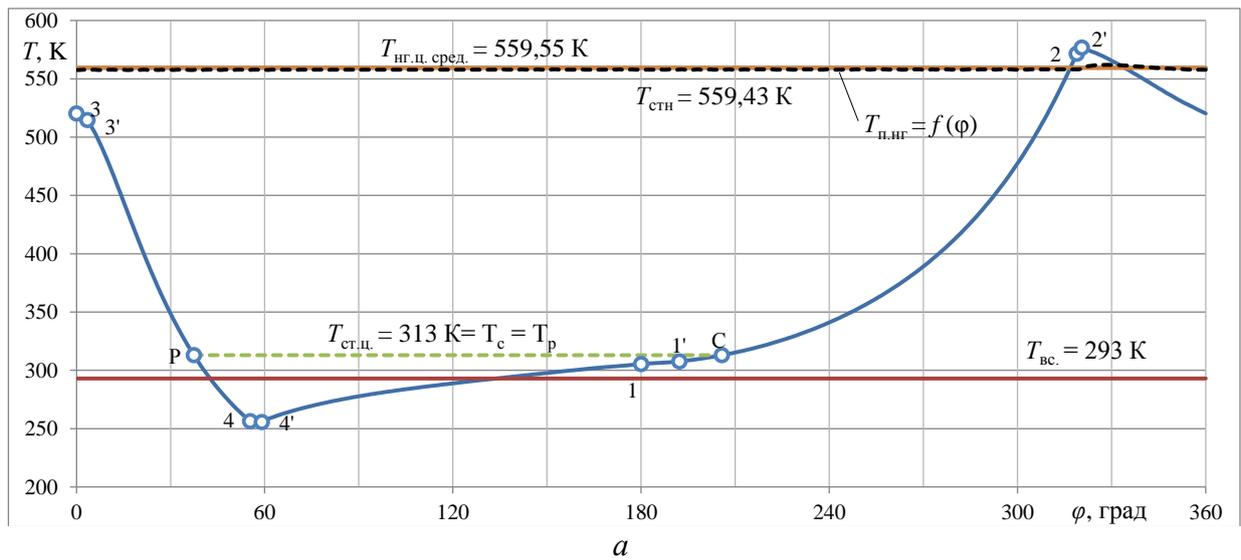


Рис. 2. Тепловое состояние ступени компрессора ПК-140-450-240:
 а – без учета ТО в ступени; б – с учетом ТО в полости нагнетания;
 в – с учетом ТО в полости нагнетания и $K_{p,\text{п.нг}} = 2,0$

Таблица 2

Взаимосвязь объема $V_{пол.нг}$ и теплообменной поверхности $f_{пол.нг}$ полости нагнетания ступени поршневого компрессора с линейным приводом ПК-140-450-240

Параметры	Размерность	Коэффициент внутреннего оребрения полости нагнетания, $K_{р.л.нг} = f_{пол.нг.i} / f_{пол.нг.I}$				
		0,137353	0,206030	0,274706	0,343383	0,412059
$f_{пол.нг}$	M^2	0,137353	0,206030	0,274706	0,343383	0,412059
$K_{р.л.нг}$	-	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0

Основной целью введения оребрения полости нагнетания является снижение температуры в СТН.

Анализ текущих параметров ступени, представленных на рис. 2 в координатах $T - s$, позволил установить следующее.

1. Процесс расширения $3' - 4$ при изменении температуры стенок полости нагнетания характеризуется по конечным параметрам как процесс с отводом теплоты к газу ($s_4 > s_{3'}$). Количество подводимой к газу теплоты соответствует величине $\Delta s_{3'-4}$. Отметим, что при уменьшении температуры стенок полости нагнетания температура газа в конце процесса расширения $T_4 = f(T_{3'}) \rightarrow \min$.

2. Процесс всасывания $4 - 1$ температуры стенок полости нагнетания протекает с подводом теплоты к газу в количестве $\Delta Q_{4-1} = f(T_{ст.н.})$ при его начальной температуре $T_4 = f(T_{ст.н.})$. Результаты расчетного исследования показывают, что температура газа в цилиндре $T_1 = T_{вс} / \lambda_T$, соответствующая началу сжатия в ступени остается практически постоянной (Табл. 2).

3. В процессе сжатия увеличение температуры стенок полости нагнетания сопровождается снижением интенсивности отвода теплоты на участке $s - 2$, на котором температура газа выше температуры стенок цилиндра (рис. 2).

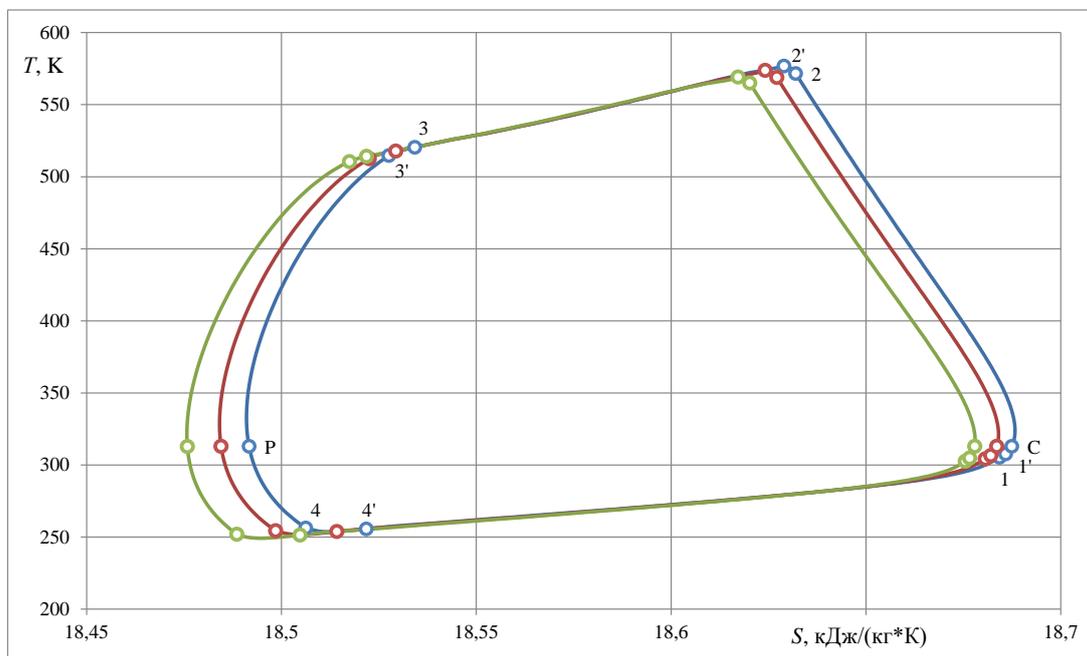
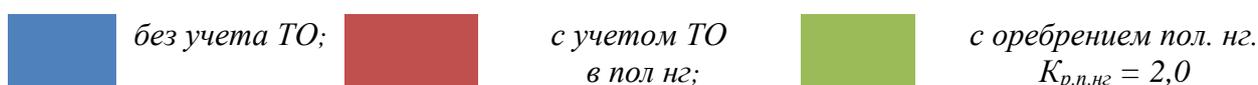


Рис. 3. Текущие параметры в ступени компрессора ПК-140-450-240:



4. Процесс нагнетания $2 - 2' - 3$ протекает с отводом теплоты ($s_3 < s_2$) и сопровождается снижением температуры газа на величину $\Delta T_{2-3} = T_2 - T_3$, достигающую значений $\Delta T_{2-3} = 38 -$

40 К. Анализ результатов показывает, что оребрение полости нагнетания позволяет снизить температуру газа в конце процесса нагнетания $T_3 < T_2$ и среднюю температуру за цикл нагнетаемого газа $T_{нг}$, что положительно с позиций теплонапряженности ступени.

Из выполненных расчетов видно, что оребрение полости нагнетания не значительно сказывается на изменении текущих параметров в ступени компрессора (рис. 3 зависимости p , $T = f(C)$), но значительно снижает температуру в СТН, что в свою очередь позволяет уменьшить конструкцию промежуточного холодильника или вообще от него избавиться.

Заключение

В результате проведенного исследования была достигнута цель и решены поставленные задачи. Стоит отметить, что, исходя из выполненных вариантов расчета, наибольшая эффективность по снижению температуры в стандартной точке нагнетания (СТН) достигается в варианте с оребрением только полости нагнетания, что позволяет сделать следующие выводы. Внутреннее оребрение полости нагнетания:

- целесообразно только в случае водяного охлаждения оребренной поверхности;
- незначительно отражается на текущей температуре газа в цилиндре, но приводит к существенному снижению его температуры в СТН, что соответствует имеющимся экспериментальным данным;
- позволяет снижать габариты промежуточного холодильника, поскольку по мере уменьшения $T_{нг.СТН}$ снижается расчетная величина теплосъема в промежуточной коммуникации;
- в реальных ступенях полезный эффект от внедрения внутреннего оребрения будет снижаться из-за сложностей, возникающих при создании увеличенной поверхности теплообмена в полостях нагнетания.

Публикации

1. Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Прилуцкий И.К., Галяев П.О. Оценка эффективности работы компрессора высокого давления на v-образных базах с различным числом рядов // Морской вестник. 2014. № 3 (51). С. 39–41.
2. Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И., Короткая И.П., Корнев В.В., Молодов М.А., Галяев П.О., Сназин А.А. Анализ процессов теплообмена в ступени высокооборотного поршневого детандера // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015. № 2 (18). С. 81–91.
3. Prilutskiy I.K., Prilutskiy A.I., Galyaev P.O., Molodov M.A. The estimation of expediency of the cylinder internal finning in the single-stage compressor with a temporary-rotary operating mode // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 233–236.
4. Галяев П.О., Молодов М.А., Молодова Ю.И., Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К. К вопросу о внутреннем оребрении рабочих камер компрессоров с повторно-кратковременным режимом работы // Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 6. С. 34–40.
5. Галяев П.О., Прилуцкий А.И. О целесообразности внутреннего оребрения примыкающих полостей поршневых компрессоров [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5675/5675.pdf> (дата обращения: 06.10.2017).
6. Прилуцкий И.К., Галяев П.О. О целесообразности внутреннего оребрения полостей всасывания и нагнетания поршневого компрессора периодического действия // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2016. С. 1.

Литература

1. Галяев П.О., Прилуцкий А.И. О целесообразности внутреннего оребрения примыкающих полостей поршневых компрессоров [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов

- конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5675/5675.pdf> (дата обращения: 06.10.2017).
2. Прилуцкий И.К., Галяев П.О. О целесообразности внутреннего оребрения полостей всасывания и нагнетания поршневого компрессора периодического действия // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2016. С. 1.
 3. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет. М., 2006. – 456 с.
 4. Беленький А.А. Действительные циклы и динамика поршневого компрессора. М., 1977. – 66 с.
 5. Кабаков А.Н., Юша В.Л. Рабочие процессы винтовых компрессоров с газожидкостным рабочим телом. Омск, 1988. – 80 с.
 6. Юша В.Л., Новиков Д.Г. Интенсификация процессов теплообмена в рабочей камере бесшмазочных компрессоров // Вестник Международной академии холода. 2004. № 4. С. 8–11.
 7. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. Л., 1969. – 744 с.
 8. Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И. Расчет и проектирование поршневых компрессоров и детандеров на нормализованных базах: учебное пособие. СПб., 1995. – 200 с.
 9. Прилуцкий А.И. и др. Анализ процессов теплообмена в ступени поршневого компрессора на основе расчетных циклов в $T-s$ и $h-m$ координатах // Компрессорная техника и пневматика. 2009. № 1. С. 14–18.
 10. Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Установки и системы низкотемпературной техники. Автоматизированный расчет и моделирование процессов криогенных систем и установок: учебное пособие. СПб., 2006. – 231 с.
 11. Новотельнов В.Н. и др. Криогенные машины: учебное пособие. СПб., 1991. – 335 с.



Головин Арсений Дмитриевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра оптико-цифровых систем и технологий
E-mail: golovin@corp.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЦИФРОВОГО КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ РАЗВЕДКИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МИННЫХ ПОЛЕЙ НА БАЗЕ БПЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ГУМАНИТАРНОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ

А.Д. Головин

Научный руководитель – профессор А.В. Демин

Из-за растущего числа военных зон и конфликтов во всем мире угроза наземных мин и неразорвавшихся боеприпасов стала серьезной проблемой, в решении которой заинтересованы многие страны. Согласно данным Международного движения за запрещение противопехотных мин (ICBL) на 2016 год, количество убитых и искалеченных людей в результате срабатывания наземных мин и других взрывных устройств достигло своего максимума за последние десять лет [1]. Более шестидесяти государств и районов классифицируются как пострадавшие от мин (по состоянию на ноябрь 2016 года).

Анализ известных методов и средств, которые могут быть применимы для дистанционного обнаружения замаскированных наземных и подповерхностных объектов, показал, что все они имеют существенные ограничения для картографирования объектов поиска на местности. Цель проекта – разработка оптико-цифрового комплекса (ОЦК) дистанционной разведки и картографирования минных полей на базе беспилотного летательного аппарата (БПЛА) легкого класса для задач гуманитарного разминирования.

Особый интерес для решения поставленной задачи представляют методы, основанные на оптико-электронных датчиках. Они базируются на использовании так называемых первичных и вторичных признаков (рис. 1). К первым относятся внешний контур и форма мины, контраст по отношению к окружающему фону, однородность изображения (равномерность яркости или облученности) внутри контура мины. Ко вторым относят такие демаскирующие признаки наблюдаемого пространства, как увядшая растительность, взрылленная почва, следы, оставленные машиной-миноукладчиком.

Обнаружение мин, установленных в грунт

по первичным признакам:

- Мина, установленная в грунт, имеет большее термическое сопротивление чем почва.
- В течение дня, почва над миной будет более теплой, чем окружающая почва.
- В вечерние часы слой почвы над миной отдает свою тепловую энергию быстрее, чем окружающая почва, и она выглядит более прохладной.

по вторичным признакам:

- Установленные в грунт мины также обнаруживаются через почвенные нарушения и растительный стресс.
- Раскопка грунта для установки мины приводит к появлению мелких частиц на поверхности
- Мина представляет собой влагобарьер для восходящего и нисходящего потока грунтовых вод, что приводит к (временному) накоплению воды над миной после дождя и к более сухой почве над миной в период засушливой погоды.

Обнаружение мин, установленных на поверхности

по первичным признакам:

- Мина, нагретая солнцем, имеет более высокий контраст по отношению к фону.
- Этот контраст присутствует также в случае, если мина окрашена для маскировки.
- Различия в форме или окраске на разных участках мины могут приводить к сложным, отличительным признакам тепловой активности из-за различного солнечного поглощения.

по вторичным признакам:

- Спектральные подписи рассеянного излучения на поверхности мин отличаются от сигнатур почвы и растительности.
- Однородный материал и плоские формы мин приводят к появлению равномерной области в гиперспектральных изображениях.
- Поляриметрическая сигнатура неструктурированных поверхностей, таких как трава, случайна, что приводит к получению неполяризованного излучения.
- Гладкие поверхности материалов имеют поляризованную сигнатуру.

Рис. 1. Физические основы предлагаемого метода

По данным анализа литературных источников [2–5], наиболее перспективным для экспериментального изучения можно назвать дальний ИК-диапазон (8–11 мкм), который является наиболее эффективной спектральной зоной для дистанционного обнаружения мин и минных полей. Оптико-электронные системы видимого и ближнего ИК-диапазонов способны производить обнаружение объектов только по вторичным признакам, которые не всегда являются достоверными и достаточными для принятия решения об обнаружении. В отличие от этих систем, приборы, работающие в дальнем ИК-диапазоне, могут обнаруживать как первичные, так и вторичные признаки. Однако широкополосное ИК-обнаружение обладает нестабильными характеристиками (низким уровнем сигнала, высоким уровнем помех) отчасти из-за суточных колебаний температуры, экологических и метеорологических условий, почвы и ее поверхностных эффектов, что приводит к падению вероятности обнаружения, либо к росту ложных тревог.

Для гиперспектральной ИК-съемки характерна более высокая производительность, поскольку она позволяет разделить спектральный интервал детектирования прибора ИК-диапазона на группу из сотен различных длин волн со спектральным разрешением около 5–10 нм, интенсивность каждой из которых изменяется в зависимости от излучательной способности и истинной температуры поверхности почвы. Это позволяет отделить нарушенную поверхность (взрыхленные признаки) от обычной почвы и насыпей (рис. 2).

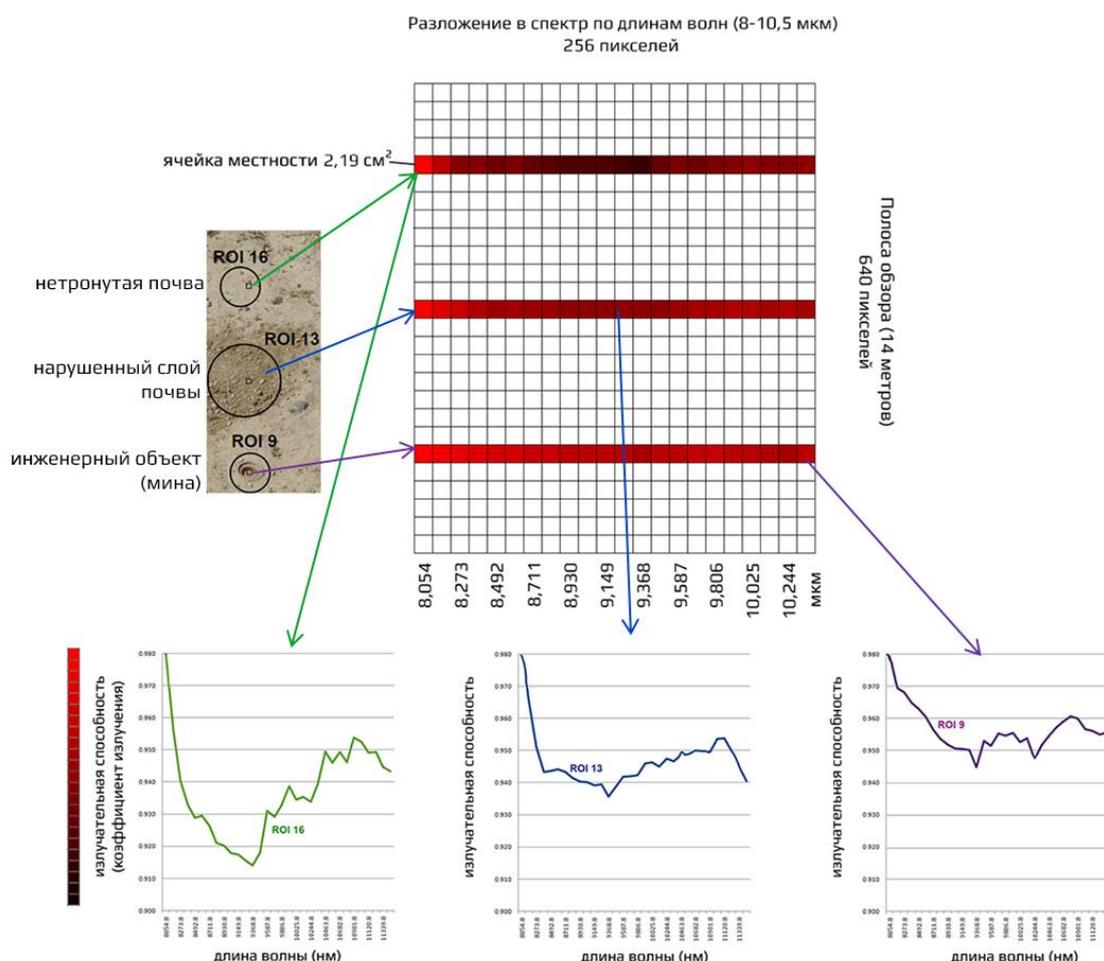


Рис. 2. Формирование спектра на матрице (показаны значения для трех пикселей полосы обзора). Гиперспектральный кадр, полученный за единицу времени, представляет собой полосу обзора местности, разложенную в спектр

В исследовании для повышения достоверности обнаружения и уменьшения частоты ложных тревог использовалась стереоскопическая гиперспектральная ИК-съемка, которая, кроме того, позволяет исключить пропуск объектов, спрятанных в растительности и заложенных под углом.

Разрабатываемый оптико-цифровой комплекс должен соответствовать следующим основным требованиям:

- обеспечивать обнаружение скрытых наземных и подповерхностных инженерных объектов с оценкой их характеристик (объем, линейные размеры, форма);
- проводить картографирование и классификацию местности для информационного обслуживания работ по гуманитарному разминированию.

Два канала (объектива) гиперспектрометра, один из которых имеет угловое смещение относительно первого, получают данные одного участка местности в разных плоскостях наблюдения. Для того чтобы покрыть две полосы (два разных поля зрения) с помощью одного спектрометра и детектора, в фокальной плоскости ИК-гиперспектрометра

устанавливаются две параллельные щели со смещением, размер которого соответствует высоте спектра первой полосы. Первый объектив установлен под углом 45° к оси надира для получения гиперспектральных изображений в наклонной проекции местности (косоугольная проекция Кавалье). Второй объектив ведет сканирование в надир (по нормали к поверхности Земли) и получает гиперспектральные данные (гиперкуб) местности в ортографической проекции. Для передачи излучения с входных объективов на щели используется зеркальная оптика: призма Шмидта и отражающие призмы. Ниже приведены тактико-технические характеристики гиперспектральной аппаратуры (Табл. 1).

Таблица 1

Тактико-технические характеристики гиперспектральной аппаратуры

Параметры	Значения
Спектральный диапазон, мкм	8–11
Потребляемая мощность, Ватт	32
Число пикселей инфракрасного ФПУ	640x512
Размер пиксела, мкм	15x15
Кадровая частота, Гц	до 210
Температурная чувствительность, мК	10
Диафрагменное число (первого и второго каналов)	f/2
Угловое поле (первого и второго каналов) 2ω , град	8
Диаметр входного зрачка (первого и второго каналов), мм	20
Полоса обзора (первого и второго каналов) для высоты 50 м, м	14
Пространство земной поверхности, охватываемое одним пикселем приемника, см ²	2,19
Спектральное разрешение $d\lambda$, нм	8

Помимо гиперспектрального прибора, ОЦК включает в себя камеру видимого диапазона (Табл. 2), установленную на трехосевом гиropодвесе, которая делает серию снимков в разных пространственных плоскостях по трассе полета с заданным временным интервалом. По полученным снимкам с помощью алгоритмов 3D-реконструкции строится цифровая модель местности высокого разрешения и далее импортируется в конечную геоинформационную систему (ГИС).

Таблица 2

Тактико-технические характеристики камеры видимого диапазона

Параметры	Значения
Спектральный диапазон камеры, мкм	0,4–0,7
Потребляемая мощность камеры с подвесом, Ватт	8
Число пикселей ФПУ видимого диапазона	5144x3800
Размер пиксела, мкм	7,4x7,4
Динамический диапазон, Дб	До 77
Кадровая частота, Гц	До 25
Стабилизация гиropодвеса (по трем осям), угл.сек/с	18

Точность съемки зависит от перепада высот снимаемой площади и присутствия на ней зданий и деревьев. При автоматическом сборе данных, GSD (расстояние между центрами пикселей, измеренными на поверхности) составляет примерно 2,2 см/пиксель на рабочей высоте.

Разрабатываемая оптико-электронная аппаратура размещается на подвесе БПЛА (преимущественно малого класса и мультироторного типа со взлетной массой до 25 кг и радиусом действия от 10 до 40 км).

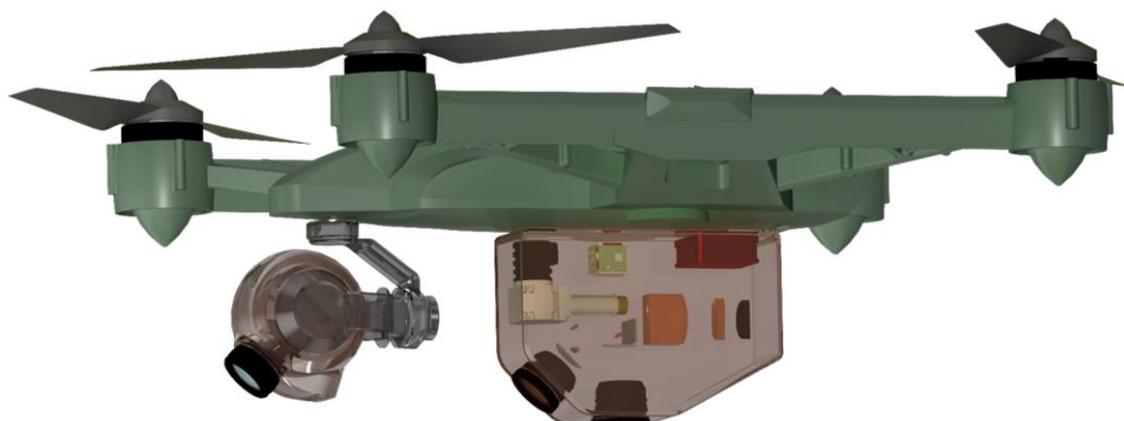


Рис. 3. Общий вид разрабатываемого ОЦК, размещенного на БПЛА

По полученным снимкам (в разных пространственных плоскостях) камеры видимого диапазона с помощью сторонних программных средств строится цифровая модель местности высокого разрешения и далее импортируется в ГИС-систему. Гиперспектральные данные, полученные двухканальным гиперспектральным прибором, проходят радиометрическую и атмосферную коррекцию. Затем проводятся тематическая классификация и поиск аномальных объектов с помощью заданных алгоритмов (сравнения с библиотечным эталоном, классификацией с помощью обучающих выборок). Результаты обработки гиперспектральных данных с двух каналов объединяются в тематическую стереомодель местности ИК-диапазона, на которой подсвечиваются найденные алгоритмом аномалии. Конечная ГИС-система должна иметь функционал, позволяющий объединить (наложить) цифровую модель местности видимого диапазона со стереомоделью местности ИК-диапазона, у которой также должна присутствовать возможность регулировки и выделения в псевдоцветах различных спектральных интервалов для их визуальной интерпретации оператором.



Рис. 4. Структурная схема обработки данных ОЦК дистанционной разведки и картографирования минных полей

Заключение

В результате выполнения проекта получены следующие результаты:

- проведен литературный обзор с целью поиска перспективных оптико-электронных средств, решающих задачи по обнаружению мин и минных полей;
- проанализированы основные физические положения, которые могут быть применимы для решения задач по обнаружению и идентификации скрытых наземных и подповерхностных объектов;
- обоснован выбор гиперспектральной системы дальнего ИК-диапазона для поиска и идентификации объектов как на поверхности почвы, так и заложенных в грунт – по первичным и вторичным физическим признакам;
- предложен новый метод обнаружения замаскированных наземных и подповерхностных объектов, в основу которого легла стереоскопическая гиперспектральная съемка в дальнем ИК-диапазоне совместно с трехмерной реконструкцией местности камерой видимого диапазона;
- разработан эскизный проект, в котором представлена концепция ОЦК дистанционного зондирования минных полей, приведены основные тактико-технические характеристики разрабатываемой аппаратуры, проведено моделирование оптической схемы дифракционного узла гиперспектрометра и энергетический расчет системы;
- предложена концепция разработки геоинформационной системы по обработке и сшивке данных ОЦК для предоставления информации конечному пользователю об обнаружении и идентификации скрытых наземных и подповерхностных объектов, разведке местности при планировании операций по минированию и разминированию, передвижению войск и прочих задач.

Публикации

1. Golovin A.D., Demin A.V. Simulation model of a multichannel Offner hyperspectrometer // *Computer Optics*. 2015. Vol. 39. No 4. P. 521–528.
2. Golovin A.D., Demin A.V. Hyperspectral gas analyzer for monitoring of oil and gas pipelines // *Proceedings of International Conference “Information Technology and Nanotechnology”*. 2016. P. 166–172.
3. Головин А.Д., Демин А.В. Малогабаритный гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазонов // *Известия вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58. № 11. С. 869–873.

Литература

1. ICBL: International Campaign to Ban Landmines [Electronic resource]: official website. URL: <http://www.icbl.org> (accessed: 18.03.2017).
2. McFee J.E. et al. Landmine detection using passive hyperspectral imaging // *Proceedings of SPIE*. 2007. Vol. 6554. P. 655404.
3. Haskett H.T. et al. Detectability of buried mines in 3- to 5- μm and 8- to 12- μm regions for various soils using hyperspectral signatures // *Proceedings of SPIE*. 2001. Vol. 4394. P. 296–309.
4. McFee J.E. et al. Comparison of broad-band and hyperspectral thermal infrared imaging of buried threat objects // *Proceedings of SPIE*. 2013. Vol. 8709. P. 870916.
5. Gagnon M.-A. et al. Airborne thermal infrared hyperspectral imaging of buried objects // *Proceedings of SPIE*. 2015. Vol. 9454. P. 94540K.



Грибаев Алексей Иванович
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра световодной фотоники
E-mail: a.gribaev@gmail.com

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
 РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ
 МАССИВОВ РЕШЕТОК БРЭГГА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ
 И ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

А.И. Грибаев

Научный руководитель – доцент С.В. Варжель

Цель проекта – разработка и создание чувствительного элемента распределенного волоконно-оптического датчика (ВОД) на основе решеток Брэгга для мониторинга температуры и деформации конструкционных элементов.

В настоящее время во многих высокотехнологичных сферах подобные датчики внедряются в оборот особенно активно. Это связано с их устойчивостью к электромагнитным возмущениям, малыми массогабаритными параметрами и относительно низкой себестоимостью [1]. Чувствительным элементом распределенного волоконно-оптического спектрально-чувствительного датчика является массив волоконных брэгговских решеток (ВБР) (рис. 1), основным параметром которых является длина волны брэгговского резонанса, установленная условием Брэгга [1]:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \tag{1}$$

где λ_B – длина волны отраженного от решетки излучения, n_{eff} – эффективный показатель преломления (ПП) сердцевины оптического волокна (ОВ) для длин волн брэгговского резонанса, Λ – период решетки Брэгга. Если внешнему воздействию подвергаются решетки Брэгга, это приводит к изменению длин волн брэгговского резонанса дифракционных структур [2].

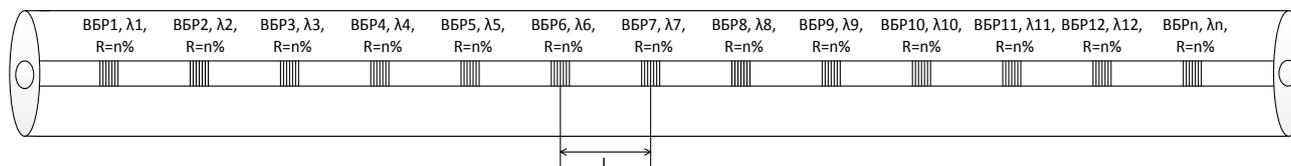


Рис. 1. Чувствительный элемент из массива ВБР, где R -коэффициенты отражения; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$ – длины волн отражения брэгговского резонанса

Смещение центральной длины волны отражения под действием деформации и температуры можно записать так:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta l} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta T} \right) \Delta T. \tag{2}$$

Первое слагаемое в выражении (2) показывает воздействие деформации на ОВ. Физический смысл его в изменении периода решетки и ПП, вызванного упругооптическим эффектом, который можно описать следующим выражением (3):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B0} (1 - p_e) \varepsilon(z), \tag{3}$$

где p_e – эффективная упруго-оптическая постоянная, определяемая как (4):

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (4)$$

где p_{11} и p_{12} – компоненты упруго-оптического тензора, n – ПП сердцевины, ν – коэффициент Пуассона (для кварцевого стекла $\nu = 0,17$).

Смещение брэгговской длины волны также происходит из-за температурного расширения структуры кварца, вызывающего изменения периода решетки и показателя преломления волокна. Такое смещение λ_B при изменении температуры ΔT выражается так:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T, \quad (5)$$

где $\alpha = (1/\lambda)(\partial \lambda / \partial T)$ – коэффициент термического расширения (для кварцевого стекла $\alpha = 0,55 \times 10^{-6}$), $\xi = (1/n)(\partial n / \partial T)$ – термооптический коэффициент (для волокон легированных GeO_2 примерно равный $8,6 \times 10^{-6}$). Очевидно, что изменение показателя преломления является доминирующим эффектом.

Запись массива ВБР осуществлялась на лабораторной установке, собранной на оптическом столе на основе интерферометра Гальбота (рис. 2) [3]. У этого интерферометрического метода записи ВБР существует ряд преимуществ: возможность изменения в широком диапазоне периода интерференционной картины путем поворота зеркал с использованием одной фазовой маски (ФМ); отсутствие непосредственного контакта ФМ и ОВ, что позволяет с высокой повторяемостью осуществлять запись массивов ВБР и решать поставленные задачи.

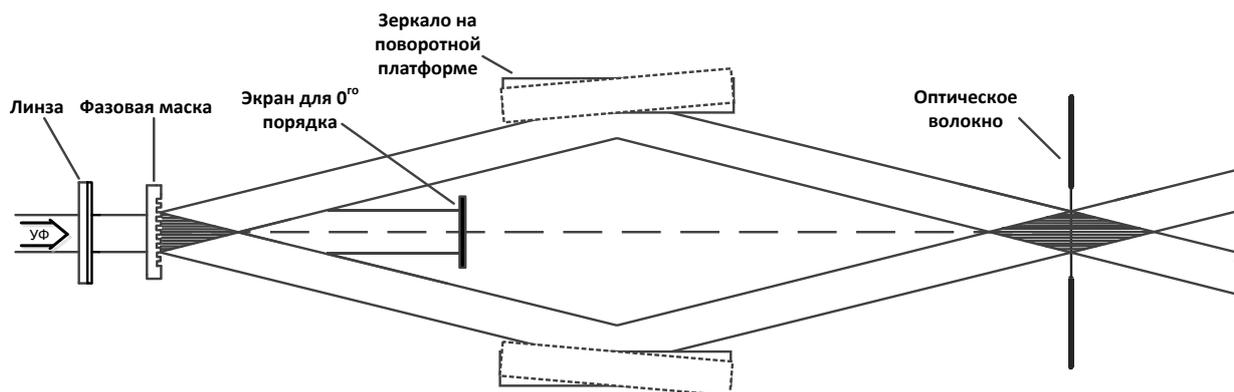


Рис. 2. Функциональная схема интерферометра Гальбота для записи ВБР

В качестве источника излучения применяется KrF -эксимерная лазерная система типа задающего генератора-усилителя мощности *Optosystems MOPA CL-7550*. Лазерная система генерирует импульсы длительностью 17 нс с длиной волны излучения 248,3 нм и работает в режиме синхронизации от 3 до 50 Гц. Энергия в импульсе данной системы достигает 250 мДж с шириной спектра излучения 3 пм и размером пучка 20 мм по вертикали и 6 мм по горизонтали. Временная когерентность излучения достигает 25 мм, а пространственная более 5 мм, что позволяет создавать контрастную интерференционную картину с помощью интерферометра с амплитудным разделением лазерного пучка.

В работе обеспечивались точная настройка и стабильная работа установки в течение длительных интервалов времени в виду критичности любых изменений в параметрах лазерного излучения и оптической схеме для записи массива ВБР.

В процессе записи настраивались и контролировались следующие параметры: распределение энергии в лазерном пучке, положение ОВ относительно пучка, период интерференционной картины, плотность энергии воздействующего излучения и ширина спектральной линии лазерного излучения. В работе были подобраны оптимальные параметры массива ВБР, которые отражены в Таблице.

На рис. 3 представлен массив из 16 ВБР типа I со спектральными интервалами, равными $2,4 \pm 0,1$ нм и коэффициентами отражения R , 88 ± 11 %. На едином отрезке ОВ были записаны ВБР в режиме многоимпульсной экспозиции. Плотность энергии импульсов на поверхности ОВ составляла около 200 мДж/см². Расстояние между решетками массива могут варьироваться в зависимости от решаемых задач. Для детектирования спектральных параметров ВБР, записанных на лабораторной установке, применяется оптический анализатор спектра *Yokogawa AQ6370C* с диапазоном измерений 600 – 1700 нм и широкополосный источник излучения *Thorlabs* с волоконным выходом.

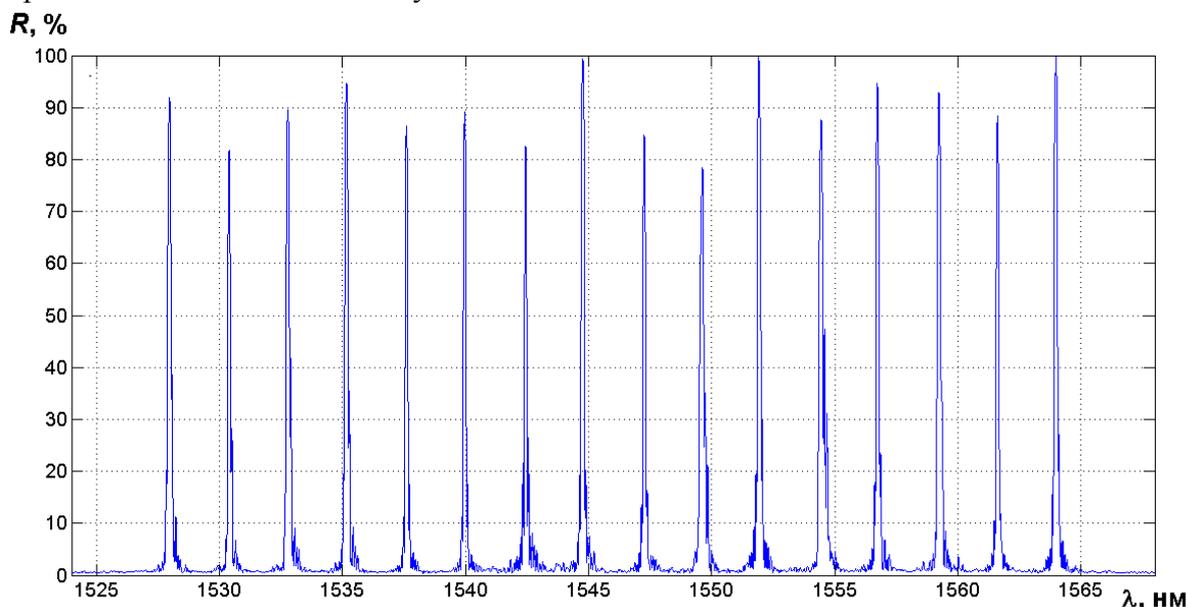


Рис. 3. Спектр массива ВБР

Данный массив решеток Брэгга может быть использован при создании спектрально-чувствительных распределенных волоконно-оптических датчиков.

Таблица 1

Параметры массива ВБР на едином участке ОВ

Параметр	Значение					
Тип волокна	Одномодовое ОВ с 12 мол.% GeO ₂ в сердцевине					
Количество ВБР на одном волокне	16 шт.					
Длина каждой ВБР	10 мм					
Расстояние между центрами ВБР	50 мм					
Длины волн и коэффициенты отражения отдельных ВБР массива	№	Длина волны, нм	R, %	№	Длина волны, нм	R, %
	ВБР1	1527,96	92	ВБР9	1547,29	84
	ВБР2	1530,42	82	ВБР10	1549,65	78
	ВБР3	1532,80	89	ВБР11	1551,95	99
	ВБР4	1535,20	95	ВБР12	1554,48	87
	ВБР5	1537,62	86	ВБР13	1556,77	95
	ВБР6	1540,00	89	ВБР14	1559,26	93
	ВБР7	1542,46	82	ВБР15	1561,64	88
ВБР8	1544,80	98	ВБР16	1563,99	99	

Запись массивов ВБР с разными длинами волн отражения предполагает точное определение показателя преломления для заданных длин волн брэгговского отражения. Для этого была составлена таблица с экспериментально полученными ПП на нескольких длинах волн и далее пересчитана для других длин волн. После предварительного определения ПП и рассчитанных углов поворота зеркал интерферометра Тальбота потребовалось перед записью каждой отдельной решетки массива ВБР записывать настроечную решетку с малым коэффициентом отражения с помощью одного импульса.

Далее, исходя из требуемого коэффициента отражения решетки, определена величина сдвига брэгговского резонанса ВБР вследствие увеличения среднего ПП в области записи решетки. В частности, для ВБР с $R = 70\text{--}100\%$ такое смещение составляет около 0,2 нм для используемого ОВ. Таким образом, чтобы записать на определенной длине волны отражения ВБР с $R = 90\%$, настроечная решетка, индуцированная одним импульсом, должна иметь длину волны λ меньше на 0,2 нм заданной. Если длина волны настроечной ВБР не соответствовала этим требованиям, то выполнялась перестройка интерферометра Тальбота.

Заключение

В ходе выполнения проекта получены следующие основные результаты:

- обеспечена стабильная работа лабораторной установки для записи массива ВБР в течение длительных интервалов времени;
- разработана методика подстройки длины волны отражения брэгговского резонанса, позволяющая записывать ВБР с центральной длиной волны отражения с точностью до 0,1 нм;
- записан массив из 16 ВБР на едином участке ОВ на расстоянии 50 мм между решетками и спектральным интервалом 2,4 нм;
- представлен спектр массива волоконных брэгговских решеток и параметры отдельных ВБР.

Публикации

1. *Varzhel' S.V., Mun'Ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V.* Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding // *Journal of Optical Technology* – 2016, Vol. 83, No. 10, pp. 638–641.
2. *Griboev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A.* Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics* – 2016, Vol. 48, No. 12, pp. 540.
3. *Munko A.S., Varzhel' S.V., Arkhipov S.V., Griboev A.I., Konnov K.A., Belikin M.N.* The study of the thermal annealing of the Bragg gratings induced in the hydrogenated birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // *Journal of Physics: Conference Series* – 2016, Vol. 735, No. 012015, pp. 1–6.
4. *Griboev A.I., Varzhel S.V., Petrov A.A., Palandzhyan D.A., Konnov K.A.* Visualization of Fiber Bragg Gratings of Type II Induced by Radiation of an ArF Excimer Laser in an Anisotropic Single-Mode Optical Fiber with an Elliptical Stress Cladding // *Optics and Spectroscopy*, 2017, Vol. 123, No. 1, pp. 172–176.
5. *Tokarev A.V., Anchutkin G.G., Varzhel S.V., Griboev A.I., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K., Rothhardt M., Elsmann T., Becker M., Bartelt H.* UV-transparent fluoropolymer fiber coating for the inscription of chirped Bragg gratings arrays // *Optics & Laser Technology*, 2017, V. 89, P. 173–178.

Литература

1. *Окиси Т.* Волоконно-оптические датчики. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. –256 с.
2. *Мешковский И.К., Варжель С.В., Беликин М.Н., Куликов А.В., Брунов В.С.* Термический отжиг решеток Брэгга при изготовлении волоконно-оптических фазовых

интерферометрических датчиков // Приборостроение. 2013.Т. 56. № 5. С 91–93.

3. *Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A.* Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // Opt. Quant. Electron. 2016. V. 48. № 540.P. 1–7.



Ерофеев Михаил Александрович
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра мехатроники
E-mail: mr.mikhail-erofeev@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СМАРТ-ОРТЕЗА НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ

М.А. Ерофеев

Научный руководитель – профессор В.М. Мусалимов

При лечении пациентов с такими заболеваниями, как мышечная дистрофия, ДЦП, паралич нижней конечности, при сгибательных контрактурах, а также при реабилитации после травм и хирургических операций используются фиксирующие и поддерживающие устройства-ортезы. Проблема создания подобных систем актуальна в наше время и требует особенного подхода к их синтезу и проектированию [1].

Цели проекта – разработка энергоэффективного смарт-ортеза на основе данных биомеханических исследований кинетических и кинематических параметров движения.

Для создания смарт-ортеза с точки зрения эффекта рекуперации энергии важно учитывать также реципрокность (взаимную противофазность), существующую при естественном движении конечностей человека. Кинетические и кинематические параметры могут быть использованы для последующей адаптации конструктивных особенностей ортеза для обеспечения требуемого движения с целью самостабилизации и создания правильного стереотипа движения в зависимости от антропометрических параметров человека и динамических параметров фазы совершаемого шага.

Данный эффект может быть достигнут благодаря использованию в смарт-ортезе различных средств контроля и фиксации изменяющихся характеристик, в том числе за счет средств «интеллектуальной механики». Но для этого необходимо проведение предварительных исследований статически и динамически изменяемых параметров движения [2].

Настоящая работа опирается на экспериментальные данные, полученные в лаборатории кинезиологии и биомеханики Тартуского университета при помощи опто-электронной системы для анализа движений *Elite (BTS Engineering S.p.A., Италия)* [3, 4]. Отражающие маркеры были прикреплены к коже исследуемых в анатомических пунктах в соответствии с биомеханической моделью (*Davis* и другие, 1991) [5]. Траектории двадцати отражающих маркеров регистрировались шестью инфракрасными камерами. Программно-аппаратной системой автоматически формировалась компьютерная база данных характеристик движения с предварительным внесением антропометрических показателей.

В результате измерений были получены пространственно-временные параметры ходьбы: скорость, ритм, фазы шага в момент опоры и переноса нижней конечности, кинетические и кинематические параметры сгибания и разгибания бедренного, коленного и голеностопного суставов, а также моментные и силовые характеристики движения.

Полученные с помощью оптической маркерной системы кинематические параметры изменения угла флексии и экстензии для тазобедренного и коленного суставов для всех исследуемых были аппроксимированы для получения средних значений (рис. 1).

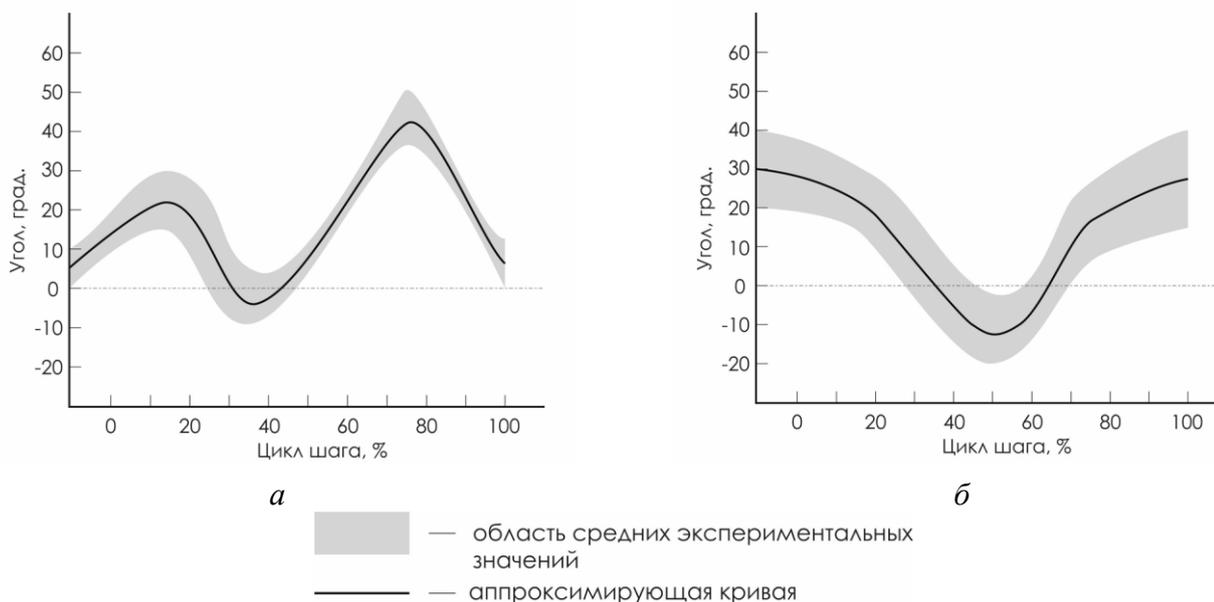


Рис. 1. Изменение угла флексии/экстензии: а – для коленного сустава; б – для тазобедренного сустава

Для формирования схемы движения в программном комплексе САПР – *SolidWorks* был спроектирован и доработан макет нижней конечности в масштабе 1:2 от реальных антропометрических значений (рис. 2).

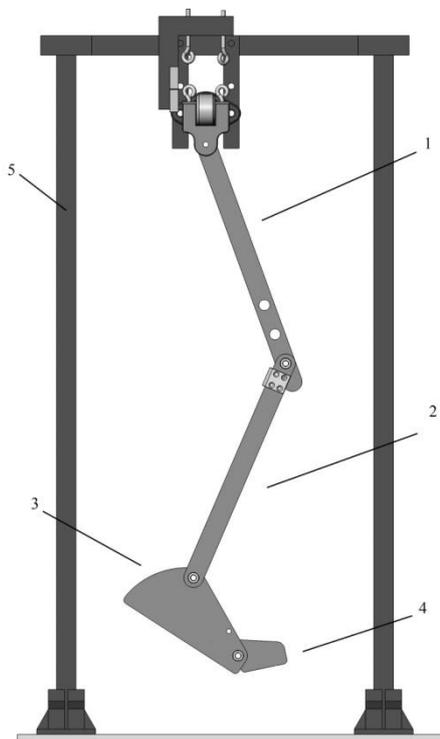


Рис. 2. Макет нижней конечности

В макете имеются звенья, отражающие взаимосвязи и части реальной конечности: бедренная часть (1), голень (2), стопа (3) и дистальная часть (фаланги пальцев) стопы (4). Все части связаны между собой шарнирной связью в местах нахождения основных суставов и жестко закреплены на неподвижном основании 5, с возможностью регулировки по высоте.

Схема движения в данном случае имеет вид четырехзвенного механизма с одной степенью свободы (рис. 3).

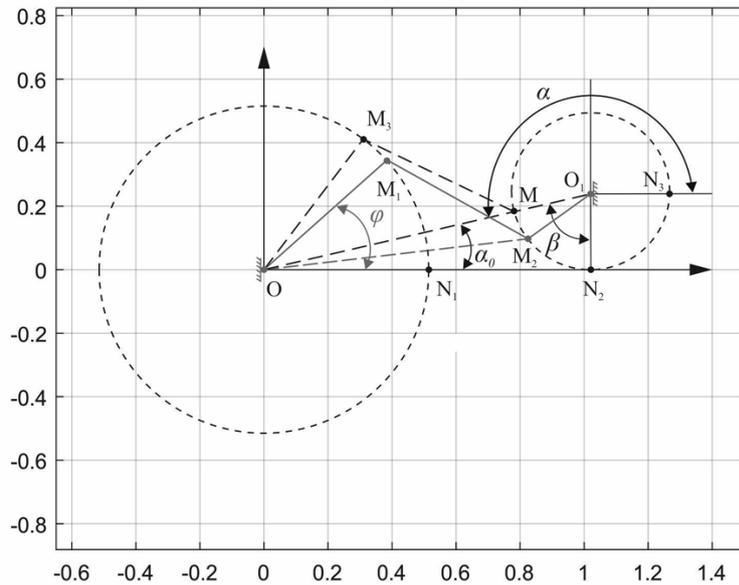


Рис. 3. Схема движения в виде четырехзвенного механизма

На представленной кинематической схеме введены следующие обозначения: $ON_2 = l_1$ – длина бедра; $O_1N_2 = r$ – длина ступни; $N_1N_2 = l_2$ – длина голени; L – суммарная длина и бедра; φ – угол поворота бедра; α_0 – фиксированный угол кинематической системы; $\beta = \pi/2 - \alpha_0$; α – угол поворота ступни; (x_1y_1) – координаты точки N_1 (текущие координаты); (x_2y_2) – координаты точки N_2 (текущие координаты).

Фиксированные углы кинематической системы определяют, с одной стороны, тригонометрические параметры, с другой стороны – предельные конфигурации системы перед завершением фазы отталкивания переднего отдела стопы или фазы контакта «носок–земля».

Рассмотрим кинематические связи системы.

1. $Pg = r\sin(\alpha)$ – проекция вращающегося отрезка O_1N_2 на горизонтальную ось;
 $Pv = r\cos(\alpha)$ – проекция вращающегося отрезка O_1N_2 на вертикальную ось.
2. Отсюда следуют вычисленные значения координат точки N_2 .

$$x_2 = L - Pg; \quad y_2 = r - Pv;$$

$$Pg^2 + Pv^2 = r^2 \rightarrow (Pg^2 + Pv^2 - r^2 = 0);$$

Координаты точки N_1 : $x_1 = l_1\cos(\varphi)$; $y_1 = l_1\sin(\varphi)$; $x_1^2 + y_1^2 = l_1^2 \rightarrow (x_1^2 + y_1^2 - l_1^2 = 0)$;

$$3. (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = l_2^2 \rightarrow ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - l_2^2 = 0);$$

Из уравнений связей следует: $(Lx_2 + ry_2) - (x_1x_2 + y_1y_2) = R$, где $R = (l_2^2 - l_1^2 + L^2)/2$.

Есть еще две связи: $z_1 = 0$; $z_2 = 0$. Таким образом, для пяти условий связи и двух точек механической (биомеханической) системы получаем систему с одной степенью свободы.

Анализ кинематики опорной фазы на носок стопы позволяет получить начальные условия для исследования движения в фазе переноса ноги с носка на пятку [6]. На рис. 3 представлена схема опорно-двигательной системы в фазе: опоры на стопу и начале фазы опоры на носок. Динамика движения в этом случае описывается уравнением:

$$\ddot{\alpha} - \frac{m_1 l_1 k \sin(\varphi) a \omega^2 \cos \omega t}{J} + \frac{g}{J} [m_1 l_1 \cos(\varphi + \alpha) + m_2 r \sin \alpha] = 0,$$

где m_1 – масса бедренной части (ON_1), m_2 – масса голени (N_1N_2), m_3 – масса стопы (N_2O_1), ω – частота колебаний тазобедренного сустава, g – ускорение свободного падения, J – момент инерции.

Заключение

Совокупность расчетных параметров и параметров, полученных в ходе исследований, может быть использована для формирования управляющего сигнала при создании системы управления (СУ) движением макета нижней конечности в нормальном режиме.

Поэтому следующей задачей проекта является адаптация данных, полученных для СУ макета, в частности для управления движением его звеньев с помощью двигателей, используя усредненные угловые значения флексии и экстензии основных суставов.

С помощью представленных в работе уравнений и их численных решений можно реализовать принцип рекуперации энергии в системе за счет применения гибких, демпфирующих элементов. При этом для описания динамики системы в фазе переноса в дальнейшем необходимо будет рассматривать систему как маятник с двумя степенями свободы.

Публикации

1. *Erofeev M.A., Lomp A.V.* Analysis and design of knee joint modules of smart-orthosis // 16th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”. Proceedings. 2017. P. 203–205.
2. *Мусалимов В.М., Пяэсуке М., Гапеева Е., Эрелине Я., Ерофеев М.А.* Моделирование динамики опорно-двигательного аппарата // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1196–1200.

Литература

1. *Erofeev M.A., Lomp A.V.* Analysis and design of knee joint modules of smart-orthosis // 16th International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”. Proceedings. 2017. P. 203–205.
2. *Колюбин С.А., Мусалимов В.М.* Биомехатроника: шаги навстречу энергоэффективным роботам // Control Engineering Россия. 2017. № 2 (68). С. 54–57.
3. *Gapeyeva H. et al.* Gait characteristics and muscle strength in total knee arthroplasty patients with patellofemoral pain syndrome before and six months after surgery // Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis. 2011. Vol. 17. P. 37–52.
4. *Prakash C. et al.* Passive marker based optical system for gait kinematics for lower extremity // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 45. P. 176–185.
5. *Davis R.B. et al.* A gait analysis data collection and reduction technique // Human Movement Science. 1991. Vol. 10. No 5. P. 575–587.
6. *Мусалимов В.М. и др.* Моделирование динамики опорно-двигательного аппарата // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1196–1200.



Ефимов Михаил Евгеньевич
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра световодной фотоники
E-mail: spbefimovmikhail@gmail.com

РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

М.Е. Ефимов

Научный руководитель – доцент А.В. Куликов

Основные цели проекта – разработка, создание и исследование волоконно-оптического датчика неразрушающего контроля композитных материалов. В работе исследуются возможные конструкции чувствительного элемента, разрабатывается оптическая схема и определяются рабочие характеристики датчика.

Акцент в исследовании был сделан на следующие основные задачи:

- выбор оптимальной конструкции чувствительного элемента для обеспечения максимальной чувствительности;
- разработку новой оптической схемы;
- выбор алгоритма демодуляции сигналов;
- создание и экспериментальное исследование образца волоконно-оптического датчика неразрушающего контроля для мониторинга состояния и целостности конструкций из сложных композитных материалов.

В ходе теоретического исследования в качестве чувствительного элемента использовалось одномодовое оптическое волокно различной длины, встроенное в композитный материал. Моделирование чувствительного элемента проводилось в среде *Comsol Multiphysics*.

Ниже приведены графики зависимости деформации чувствительного элемента, встроенного в композитный материал, от частоты акустического воздействия плоской волной амплитудой 1 Па, полученные в ходе моделирования (рис. 1).

Для формирования чувствительного элемента на оптическом волокне подойдут как волоконные брегговские решетки (ВБР), так и полупрозрачные зеркала. В данной работе были применены полупрозрачные зеркала, поскольку резонансная длина волны ВБР меняется при деформации. Таким образом, в процессе эксплуатации композитного материала, который иногда испытывает большие нагрузки, динамически меняющиеся с низкой частотой, резонансная длина волны ВБР может выйти за диапазон лазерного источника.

Также была разработана новая оптическая схема датчика неразрушающего контроля, не имеющая в составе компенсационного интерферометра, где интерференция достигается путем посылки в оптическую схему оптических импульсов, по длительности вдвое превышающих длину чувствительного элемента. Более подробно оптическая схема и принцип ее работы описаны в патенте № 2624837 [1]. Это позволило избавиться от паразитных сигналов, возникающих при воздействии внешних факторов на компенсационный интерферометр, таких как акустические и вибрационные сигналы [2-3]. Оптическая схема приведена на рис. 2.

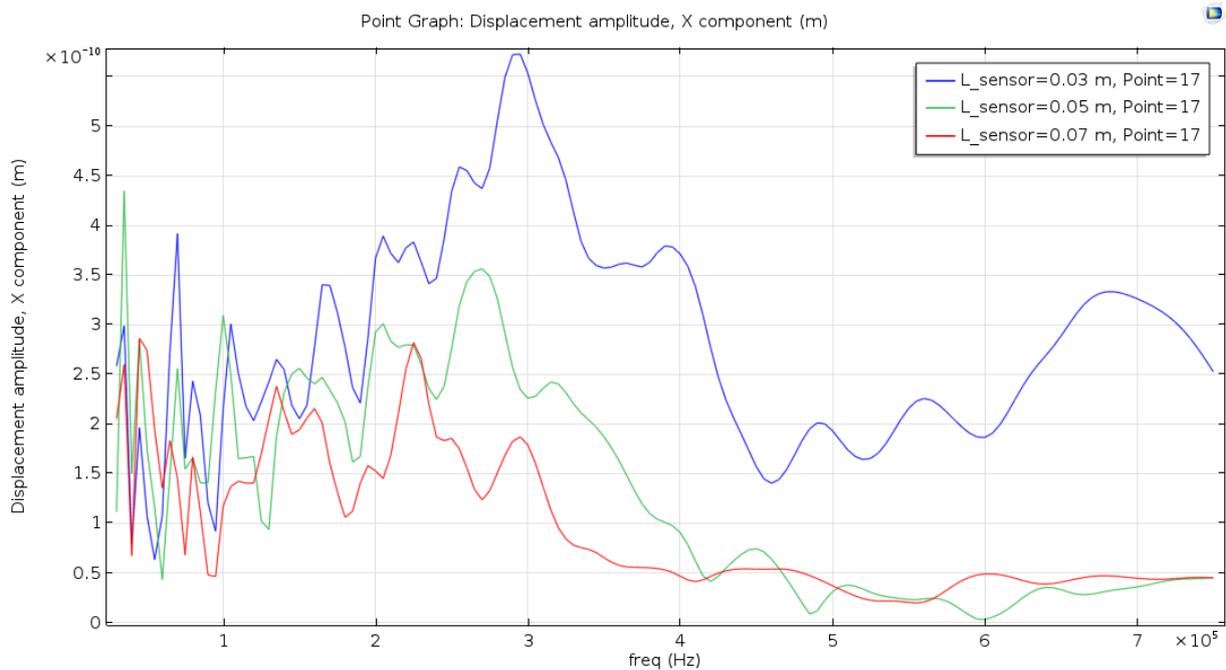


Рис. 1. Зависимость величины деформации чувствительного элемента различной длины от частоты воздействия

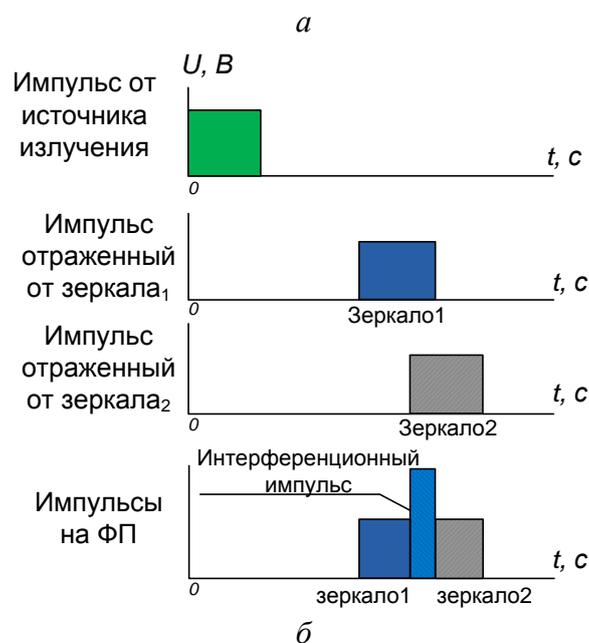
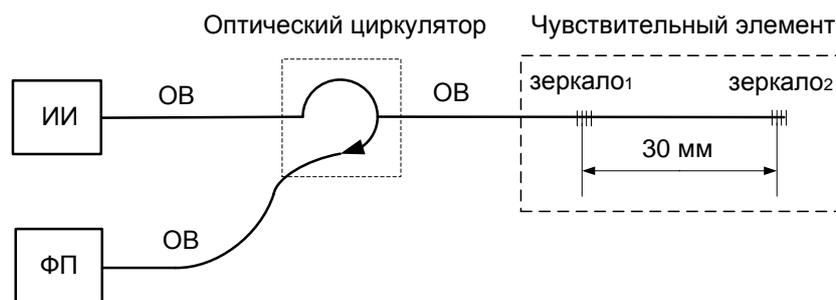


Рис. 2. а – оптическая схема волоконно-оптического датчика неразрушающего контроля: ИИ – источник излучения, ФП – фотоприемник, ОВ – оптическое волокно; б – принцип ее работы

Была проведена оценка работоспособности разработанного алгоритма демодуляции сигналов. Для проверки в качестве чувствительного элемента применялся волоконно-оптический интерферометрический датчик длиной 30 мм, закрепленный с помощью эпоксидного клея на поверхности композитной пластины толщиной 5 мм.

Для проверки работоспособности датчика были использованы источник Су-Нильсена [4] в качестве генератора контрольного импульса акустической эмиссии и металлический шарик.

Были проведены исследования по возможности детектирования воздействий от источника Су-Нильсена и от падения металлического шарика диаметром 6 мм. Детектирование производилось в полосе частот 10–250 кГц (рис. 3, 4).

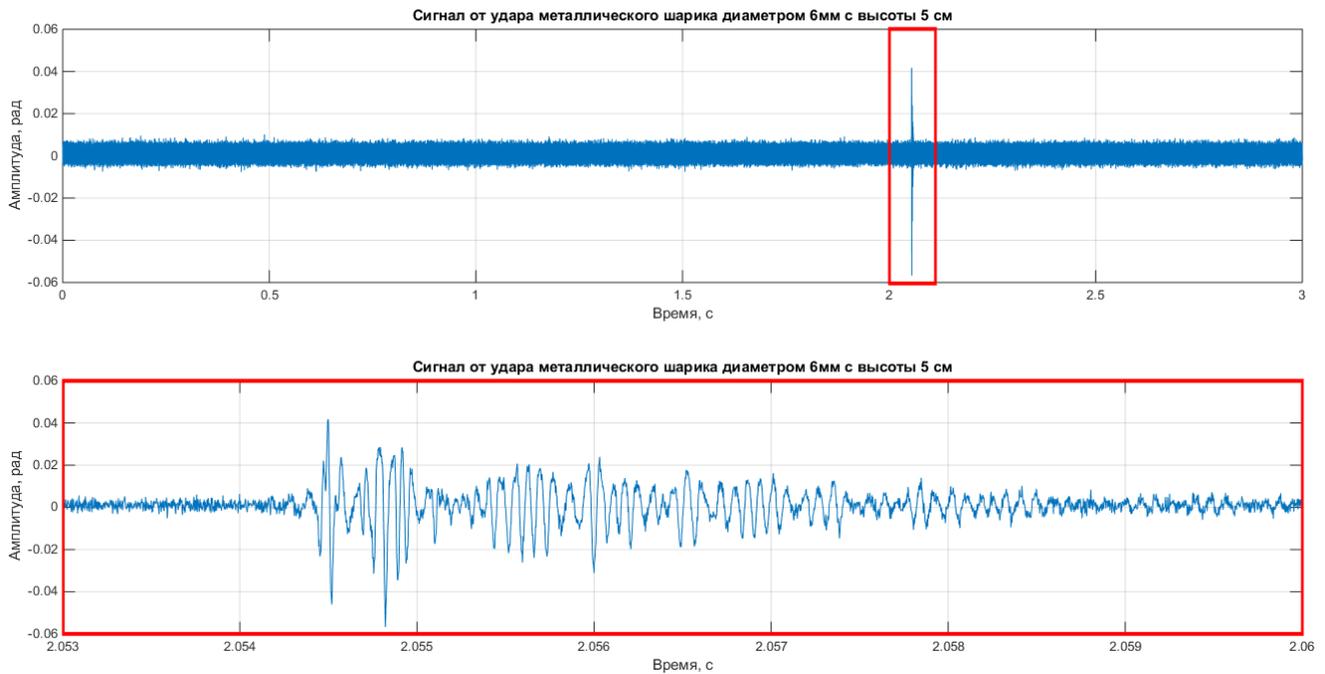


Рис. 3. Сигнал от удара металлического шарика диаметром 6 мм с высоты 50 мм на расстоянии 10 см от датчика. Отношение сигнал/шум $\approx 23,5$ дБ

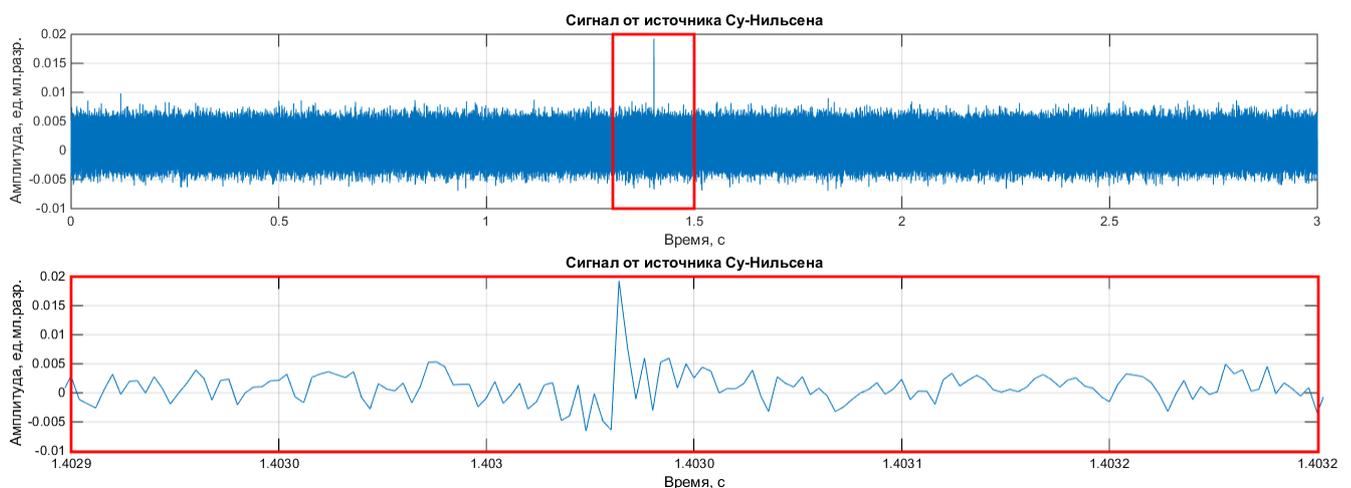


Рис. 4. Сигнал от источника Су-Нильсена на поверхности датчика. Отношение сигнал/шум $\approx 12,7$ дБ

Были сравнены сигналы, полученные с волоконно-оптического датчика (ВОД) и преобразователя GT301 (рис. 5):

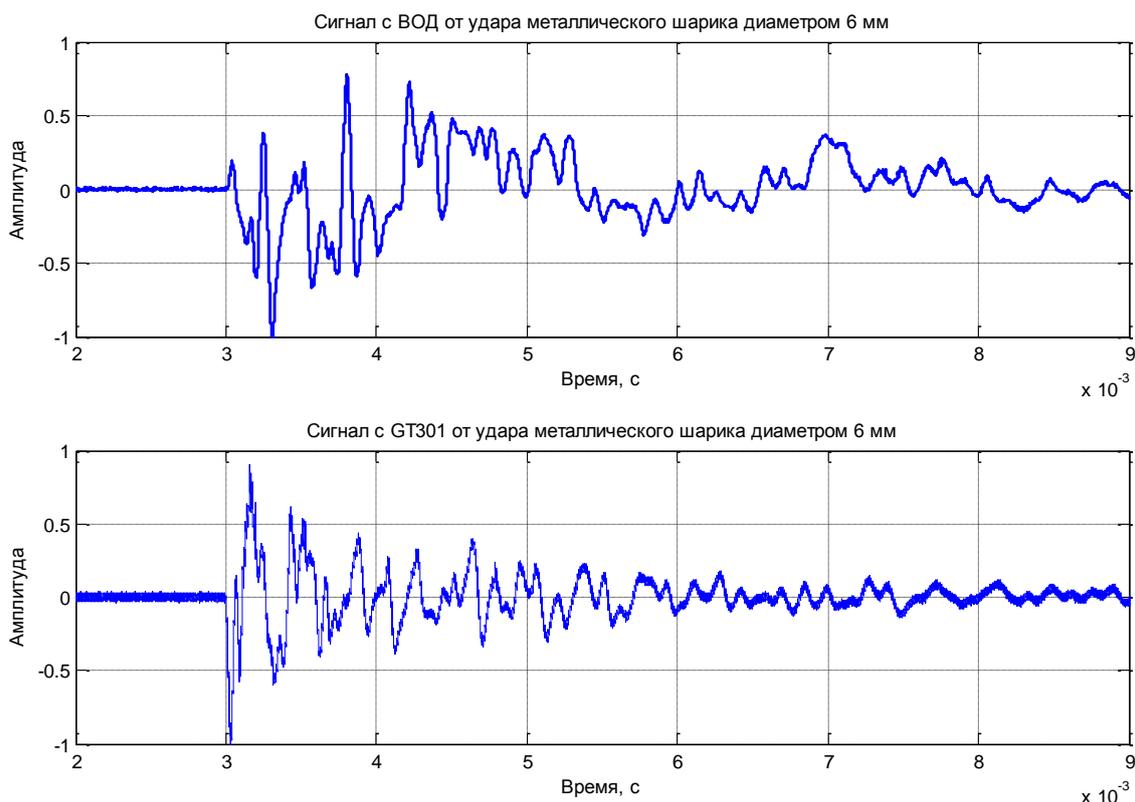


Рис. 5. Сравнение сигналов АЭ от падения шара с преобразователя акустической эмиссии GT301 и ВОД АЭ, закрепленного на поверхности пластины

Заключение

В ходе исследования были получены следующие результаты:

- разработана оригинальная оптическая схема и получен патент на ее изобретение;
- произведено моделирование конструкции волоконно-оптического датчика акустической эмиссии;
- выбрана оптимальная конструкция с требуемой частотной характеристикой;
- изготовлен волоконно-оптический датчик неразрушающего контроля в соответствии с выбранными в ходе моделирования параметрами;
- экспериментально исследован изготовленный датчик неразрушающего контроля на поверхности композитного материала;
- выполнено внедрение разработанного датчика неразрушающего контроля в структуру композитного материала и исследованы его эксплуатационные характеристики;
- разработаны методики стабилизации рабочей точки интерферометра;
- выполнено мультиплексирование нескольких датчиков неразрушающего контроля.

В результате была достигнута основная цель проекта – разработка, создание и исследование волоконно-оптического интерферометрического датчика неразрушающего контроля для обнаружения и определения местоположения возникающих дефектов в композитных материалах в процессе их эксплуатации.

Публикации

1. Ефимов М.Е., Киреенков А.Ю., Алейник А.С., Мехреньгин М.В. Снижение уровня шумов в измерительном тракте интерферометрического волоконно-оптического гидрофона // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2015.

2. Патент на изобретение 2624837 Российская Федерация. Волоконно-оптическое устройство для регистрации фазовых сигналов / М.Е. Ефимов, И.К. Мешковский, А.В. Куликов. Оpubл. 2017.

Литература

1. Патент на изобретение 2624837 Российская Федерация. Волоконно-оптическое устройство для регистрации фазовых сигналов / М.Е. Ефимов и др., Оpubл. 2017.
2. Ефимов М.Е. и др. Снижение уровня шумов в измерительном тракте интерферометрического волоконно-оптического гидрофона // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2015.
3. Kersey A.D. et al. Time-division multiplexing of interferometric fiber sensors using passive phase-generated carrier interrogation // Optics Letters. 1987. Vol. 12. No 10. P. 775–777.
4. ГОСТ Р ИСО 22096-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии.



Жуков Михаил Валерьевич
Факультет физико-технический
Кафедра нанофотоники и метаматериалов
E-mail: cloudjyk@yandex.ru

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ ЗОНДА-НАНОКАПИЛЛЯРА

М.В. Жуков

Научный руководитель – профессор А.О. Голубок

Цель проекта – создание и апробация отечественного прототипа сканирующего зондового микроскопа с совмещением ионной и силовой мод на основе специализированного зонда-нанокапилляра на объектах как живой, так и неживой природы.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из немногих методов диагностики, позволяющих визуализировать нативные биологические объекты (клетки, бактерии, ДНК и т. п.) в жидкости с высоким пространственным разрешением. Тем не менее использование методов СЗМ, таких как атомно-силовая микроскопия (АСМ), приводит к искажению мягких биологических объектов даже в полуконтактном силовом режиме. В последнее время в связи с возможностью уменьшения инвазивности изучения нативных объектов в жидкости получил развитие метод сканирующей микроскопии ионной проводимости (СМИП) [1, 2]. Интерес к СМИП также обусловлен отличным от АСМ механизмом возникновения контраста изображения, что может дать дополнительную информацию об изучаемом объекте и возможность совмещения с методом *patch-clamp* [3, 4].

Для решения этой проблемы разработан метод совмещения сканирующей силовой микроскопии и микроскопии токов ионной проводимости при использовании трубчатого пьезодатчика и специализированных зондов-нанокапилляров (НК).

Создание прототипа микроскопа для совмещения методов АСМ и СМИП, а также апробация работы зондов-нанокапилляров проводилась на базе комплекса сканирующей

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

зондовой микроскопии *NanoTutor (NT-SPb, Россия)*. С целью совмещения методов АСМ и СМИП зонд НК был закреплен с помощью адгезива на специальном трубчатом пьезодатчике с тремя электродами на его поверхности. В качестве заготовок для НК использовались боратные стекла, в качестве электролита – физиологический раствор *NaCl*.

Работа в режиме СМИП осуществлялась при характерных значениях ионного тока 16–18 нА и напряжениях около $\pm(0,4–0,6)$ В. Использование зонда НК в полуконтактном АСМ режиме проходило при подавлении амплитуды раскачки до 10–15 % ($A/A_{max} = 0,85–0,9$) при частоте 5–9 кГц. Проведено не менее ста измерений структуры в различных областях поверхности образцов. При исследовании вольт-амперных характеристик было выявлено смещение потенциала в процессе работы в режиме СМИП, что указывает на необходимость периодической перезарядки электродов – электрохимического формирования слоя *AgCl* на *Ag*.

Для повышения контраста и устойчивости СМИП-изображений для сглаживания торцевой поверхности НК подвергались кратковременному нагреву с оплавлением вершины капилляра до ~ 850 °С (рис. 1). При использовании зонда НК в силовом режиме была обнаружена неустойчивость, приводящая к появлению шумов и постепенному его разрушению. Для повышения устойчивости НК и улучшения качества изображения, к вершине капилляра сбоку была прикреплена *Au*-сфера калиброванного диаметра ~ 200 нм. Прикрепление осуществлялось с помощью диэлектрофоретических сил и сил Ван-дер-Ваальса при зарядке частиц под пучком электронов [5], после чего осуществлялось приваривание частицы к НК путем осаждения газа-прекурсора на основе углерода.

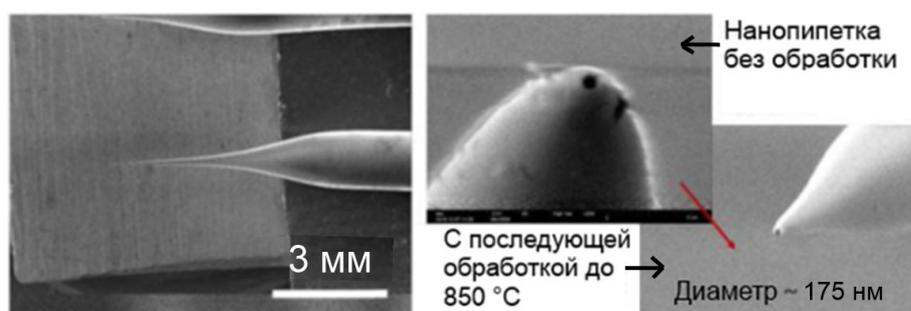


Рис. 1. Обзорное СЭМ-изображение зонда НК и изображение его вершины до и после температурной обработки

Апробация зондов НК проводилась на образцах как живой, так и неживой природы в воздушной и жидкой среде *NaCl* на поверхности полиэтиленового образца с периодической структурой и нативной клеточной культуре *CHO (Chinese Hamster Ovary)*.

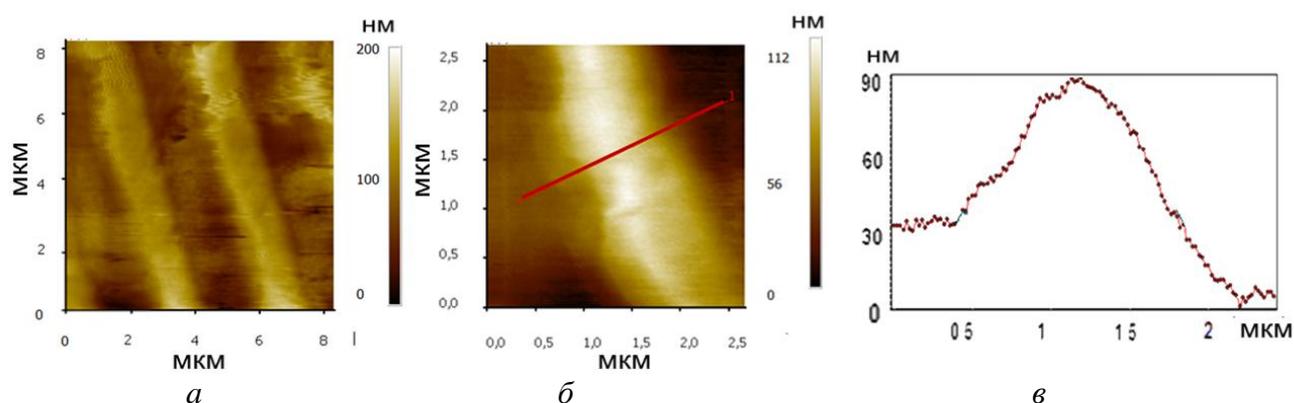


Рис. 2. а – характерное СМИП-изображение реплики калибровочной решетки *TGZ2*; б – увеличенное изображение одной полосы; в – ее поперечное сечение в жидкости

На рис. 2 показаны СМИП-изображения реплики решетки *TGZ*, полученной зондом НК. Период структуры составил $3,4 \pm 0,3$ мкм, высота 84 ± 22 нм. Замечены небольшие срывы СМИП-изображения на границе ступенек по сравнению с полуконтактным режимом АСМ, однако в целом АСМ и СМИП-изображения демонстрируют хорошую корреляцию. Для повышения устойчивости НК в режиме АСМ к вершине НК сбоку были прикреплены калиброванные *Au*-сферы радиусом ~ 200 нм. Касание локализовано в одном месте на выступающей наносфере, что позволяет улучшить взаимодействие и снизить шумы (рис. 3). Так, для НК со сферой средние значения по высоте составили около 87 ± 4 нм, тогда как для НК без сферы – около 96 ± 47 нм с учетом шума. Следует отметить, что при использовании наносферы резонанс зонда снизился со значений около $9,3 \pm 0,9$ кГц до значений около $5,2 \pm 0,5$ кГц. При этом наносфера не влияет на протекание ионного тока в режиме СМИП, так как находится на расстоянии от образца и не загромождавает выходное отверстие НК.

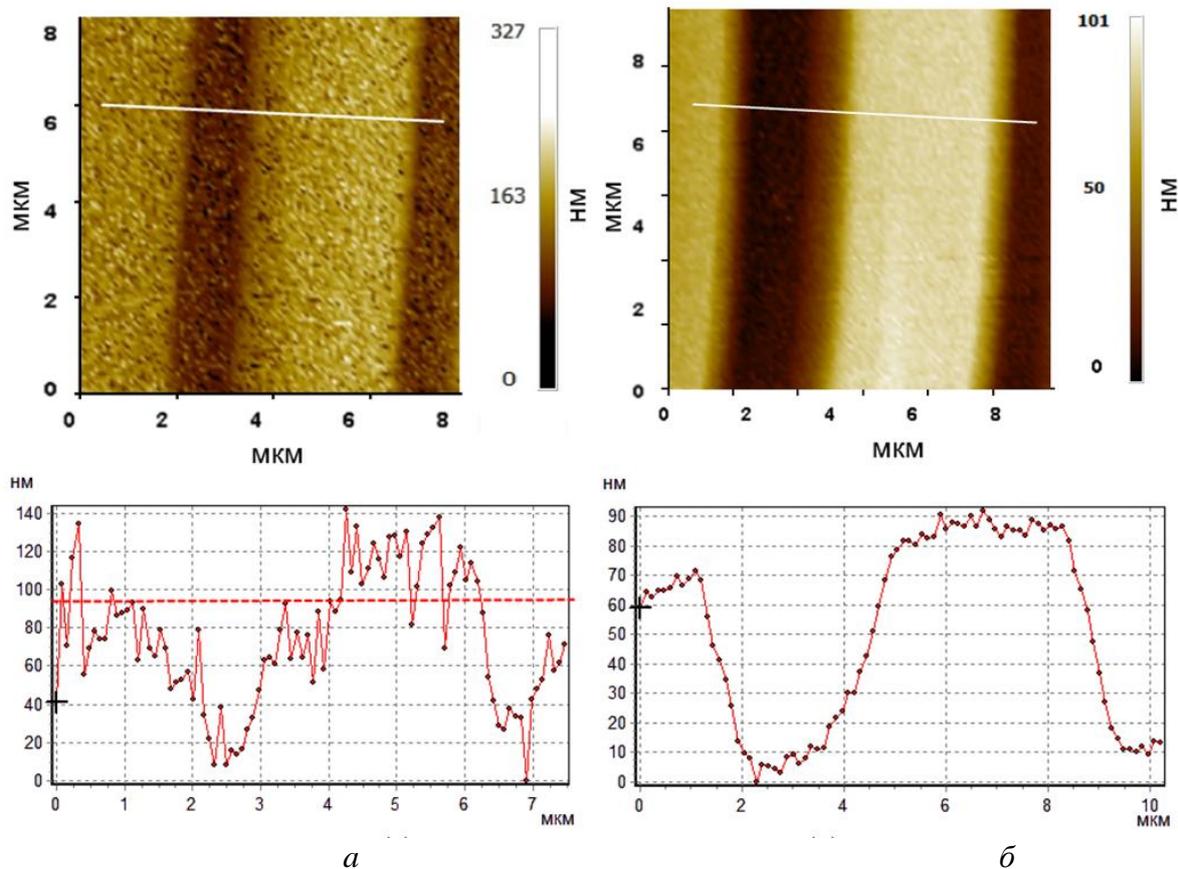


Рис. 3. АСМ-изображение калибровочной сетки *TGZ*, измеренное: *а* – стандартным НК; *б* – НК с сферой. Пунктирной линией в области (*а*) показана усредненная линия высоты структуры

Проведена визуализация клеточной культуры *CHO* (*Chinese Hamster Ovary*) методами АСМ и СМИП. Показано СМИП-изображение ядра нативной клетки *CHO* в жидкости с поперечным сечением, сделанное зондом НК (рис. 4). В целом видна корреляция изображений, полученных методами АСМ и СМИП. Стоит отметить, что в нативном состоянии клетки *CHO* имели более распластанную по поверхности форму, за счет чего перепад высот составил меньшие значения при использовании метода СМИП.

Таким образом, показана эффективность использования зондов НК для исследования объектов живой и неживой природы методами СМИП, а локализация наносферы на его вершине позволяет повысить его устойчивость в режиме АСМ. Использование пьезодатчика дает возможность объединить методы СМИП и АСМ. При этом выявлена хорошая

корреляция изображений тестовых объектов, полученных разными методами при использовании зонда НК.

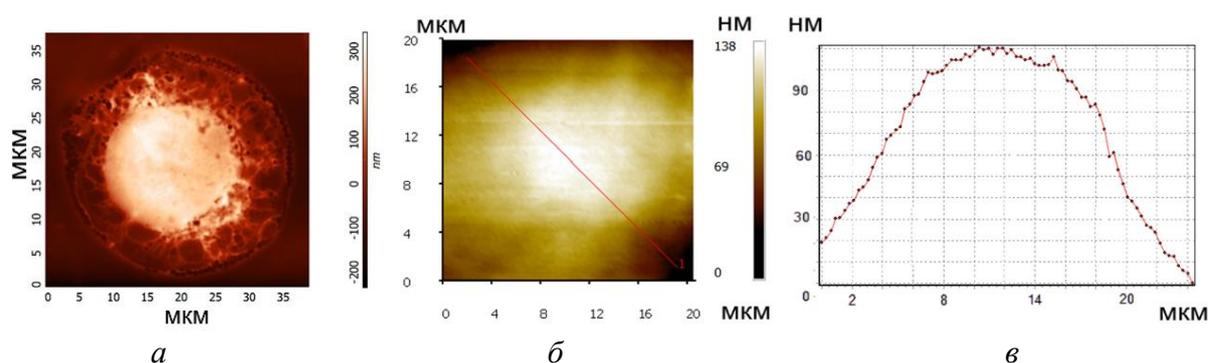


Рис. 4. а – АСМ-изображение единичной нативной клетки СНО;
б – СМПП-изображение ядра единичной нативной клетки СНО в жидкости;
в – его поперечное сечение

Все достигнутые результаты в рамках реализации научного проекта соответствуют поставленным целям и задачам, описанным в заявке.

Заключение

В ходе выполнения проекта проведена разработка, исследование и апробация специализированных зондов-нанокапилляров. Осуществлен анализ имеющейся литературы, подбор образцов и подготовка оборудования. Разработан метод совмещения сканирующей силовой микроскопии и микроскопии токов ионной проводимости. Выявлена высокая корреляция изображений, полученных разными методами.

Проведен анализ данных спектроскопии и выявлены оптимальные параметры формирования зондов-нанокапилляров. Установлено, что присутствие наносферы повышает их устойчивость в силовом режиме исследований. Выполнена апробация зондов-нанокапилляров на тестовых образцах и нативных биообъектах (клетки СНО). Устранен артефакт изображения в виде шумов в силовом режиме исследований.

Публикации

1. Zhukov M.V., Sapozhnikov I.D., Golubok A.O., Chubinskiy-Nadezhdin V.I., Komissarenko F.E., Lukashenko S.Y. Scanning ion-conductance and atomic force microscope with specialized sphere-shaped nanopipettes // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 917. P. 042022.
2. Zhukov M.V., Mukhin I.S., Golubok A.O. Development and approbation of nanoscalpels based probes for atomic force microscopy in the field of plasmonics // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 816. No 1. P. 012037.
3. Гуляев Н.И., Жуков М.В., Голубок А.О., Куранов Г.Л., Борисов Ю.А., Суглобова Е.Д., Кузнецов В.В., Перемышленко А.С., Гордиенко А.В., Костина О.В. Характеристика адгезивных свойств эндотелия и субэндотелиальных структур аортальных полулуний у больных кальцинирующим аортальным стенозом // Клиническая медицина. 2017. Т. 95. № 4. С. 350–355.
4. Zhukov M.V., Sapozhnikov I.D., Golubok A.O., Chubinskiy-Nadezhdin V.I. Scanning ion-conductance microscope // 4th International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2017”: abstracts. 2017. P. 215–217.

Литература

1. Happel P. et al. Scanning ion conductance microscopy – a tool to investigate electrolyte-nonconductor interfaces // Modern Research and Educational Topics in Microscopy / ed. by A. Méndez-Vilas, J. Díaz. Vol. 2. 2007. P. 968–975.

2. *Happel P. et al.* Scanning ion conductance microscopy for studying biological samples // *Sensors*. 2012. Vol. 12. No 11. P. 14983–15008.
3. *Bhargava A. et al.* Super-resolution scanning patch clamp reveals clustering of functional ion channels in adult ventricular myocyte // *Circulation Research*. 2013. Vol. 112. No 8. P. 1112–1120.
4. *Novak P. et al.* Nanoscale-targeted patch-clamp recordings of functional presynaptic ion channels // *Neuron*. 2013. Vol. 79. No 6. P. 1067–1077.
5. *Denisyuk A.I. et al.* Electrostatic pick-and-place micro/nanomanipulation under the electron beam // *Microelectronic Engineering*. 2014. Vol. 121. P. 15–18.



Зименко Константин Александрович
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: kostyazimenko@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФИНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ЗАПАЗДЫВАНИЯ

К.А. Зименко

Научный руководитель – доцент А.С. Кремлев

Часто на практике необходимо использование алгоритмов управления и наблюдения за вектором состояний, которые гарантируют выполнение всех переходных процессов на конечном интервале времени. Такие алгоритмы востребованы, например, в робототехнических, мехатронных, транспортных и других устройствах. Поэтому проблема финитного управления весьма актуальна и является предметом ряда исследований на протяжении многих лет [1–5].

Однако большинство алгоритмов управления, обеспечивающих устойчивость на конечном интервале времени, являются неприменимыми при реализации на практике ввиду низкой робастности по отношению к неопределенностям объекта управления, высокой чувствительности к шумам, возмущениям и т. д. Анализ современного состояния исследований по теме также говорит об отсутствии содержательных алгоритмов по настройке параметров финитных регуляторов, а теоремы об обеспечении финитной устойчивости свидетельствуют только о существовании параметров регулятора. В силу этого реализация данных алгоритмов на реальных технических объектах либо невозможна, либо требует больших объемов вычислений и длительной предварительной настройки.

Цель проекта – разработка методов построения и настройки систем финитного управления сложными динамическими системами, которые:

- робастны по отношению к неопределенностям, возмущающим воздействиям, канальным ограничениям, запаздыванию;
- обладают простотой инженерной реализации.

В ходе выполнения проекта были разработаны новые методы и подходы синтеза алгоритмов финитного управления сложными динамическими объектами с использованием метода неявных функций Ляпунова, теории обобщенно-однородных систем,

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

параметрической настройки с помощью решения линейных матричных неравенств и других. В частности, развиты результаты, полученные в статьях [6–8] для создания таких нелинейных законов управления, которые позволяют сделать систему обобщенно однородной с отрицательным показателем и гарантировать финитную и сверхфинитную устойчивость и робастность. В работах [9, 10] было показано, что если рассматриваемая система является обобщенно-однородной с отрицательной степенью и асимптотически устойчивой (то есть система финитно-устойчива) в отсутствие запаздывания, то свойства асимптотической устойчивости сохраняются относительно некоторого компактного множества для любого значения запаздывания. Полученный результат позволяет говорить о целом ряде дальнейших исследований, например, разработке алгоритмов управления, гарантирующих ограниченность ошибок регулирования для любого запаздывания в каналах управления и измерения и обеспечивающих конечное время сходимости в условиях отсутствия запаздывания.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают эффективность предложенных методов (рис. 1, 2). На рис. 1 приведены переходные процессы финитной системы управления системой двойного интегратора. На рис. 2 представлены результаты моделирования данной системы при наличии запаздывания, где предполагается, что вектор состояния в приведенном примере доступен для измерения с некоторыми запаздываниями $\tau_i \in (0, \tau_{\max})$, $i = \overline{1, 2}$, $0 < \tau_{\max} \leq \tau_0 < +\infty$.

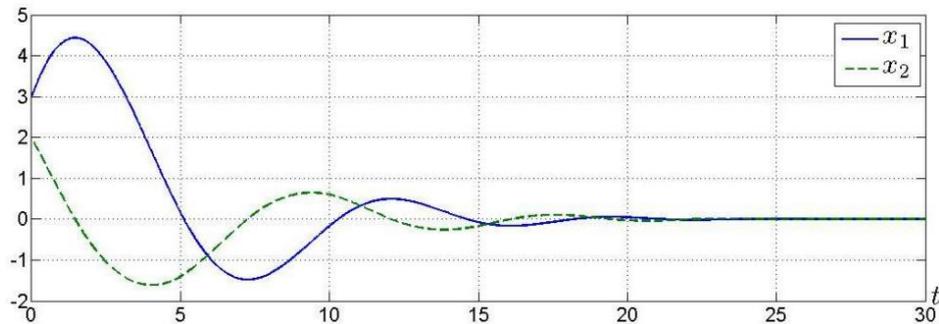


Рис. 1. Переходные процессы состояний системы

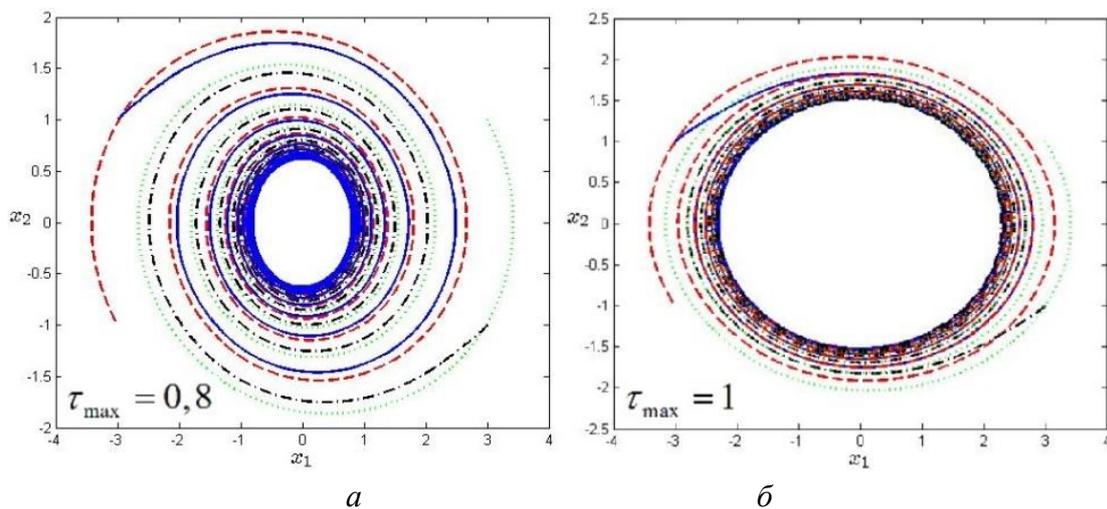


Рис. 2. Результаты моделирования: а – $\tau_{\max} = 0,8$; б – $\tau_{\max} = 1$

Заключение

В рамках выполнения проекта были разработаны новые методы и подходы синтеза алгоритмов финитного управления сложными динамическими объектами с использованием метода неявных функций Ляпунова, теории обобщенно однородных систем, параметрической настройки с помощью решения линейных матричных неравенств и других.

В частности, были развиты ранее созданные результаты для синтеза таких нелинейных законов управления, которые позволяют сделать систему обобщенно однородной с отрицательным показателем и гарантировать финитную устойчивость и робастность.

В ходе выполнения проекта решены следующие задачи:

- проведен аналитический обзор информационных источников;
- осуществлен анализ задач финитного управления сложными динамическими системами в условиях параметрических, сигнальных и структурных неопределенностей, детерминированных возмущающих воздействий, запаздывания и ограничений на каналы управления;
- разработаны алгоритмы финитного управления для одноканальных систем в условиях неучтенной динамики, детерминированных возмущений, запаздывания и наличия ограничений на каналы управления;
- проверена работоспособность разработанных алгоритмов финитного управления компьютерным моделированием.

Публикации

1. *Zimenko K.A., Polyakov A.E., Efimov D.V., Kremlev A.S.* Feedback sensitivity functions analysis of finite-time stabilizing control system // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2017. Vol. 27. No 15. P. 2475–2491.
2. *Zimenko K.A., Polyakov A.E., Efimov D.V.* Stabilization of chain of integrators with arbitrary order in finite-time // *54th IEEE Conference on Decision and Control*. 2015. P. 4637–4641.
3. *Zimenko K.A., Polyakov A.E., Efimov D.V., Perruquetti W.* Time-delay robustness analysis for systems with negative degree of homogeneity // *Preprints of 10th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS)*. 2016. P. 558–563.
4. *Zimenko K.A., Polyakov A.E., Efimov D.V., Perruquetti W.* A note on delay robustness for homogeneous systems with negative degree // *Automatica*. 2017. Vol. 79. P. 178–184.
5. *Zimenko K.A., Polyakov A.E., Efimov D.V., Kremlev A.S.* Frequency domain analysis of control system based on implicit Lyapunov function // *European Control Conference (ECC)*. 2016. P. 587–593.
6. *Зименко К.А., Поляков А.Е., Ефимов Д.В., Кремлев А.С.* Устойчивость системы последовательно соединенных интеграторов на конечном интервале времени // *Известия вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58. № 9. С. 681–686.

Литература

1. *Amato F., Ariola M.* Finite-time control of discrete-time linear systems // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. Vol. 50. No 5. P. 724–729.
2. *Roxin E.* On finite stability in control systems // *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*. 1966. Vol. 15. No 3. P. 273–283.
3. *Levant A.* On fixed and finite time stability in sliding mode control // *IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2013. P. 4260–4265.
4. *Bhat S.P., Bernstein D.S.* Finite-time stability of continuous autonomous systems // *SIAM Journal of Control and Optimization*. 2000. Vol. 38. No 3. P. 751–766.
5. *Moulay E., Perruquetti W.* Finite-time stability and stabilization: state of the art // *Advances in Variable Structure and Sliding Mode Control* / ed. by C. Edwards et al. Berlin, 2006. P. 23–41.
6. *Поляков А.Е.* О синтезе субоптимальной по быстрдействию обратной связи методом линейных матричных неравенств // *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 5. С. 145–164.

7. Zimenko K.A. et al. Feedback sensitivity functions analysis of finite-time stabilizing control system // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2017. Vol. 27. No 15. P. 2475–2491.
8. Zimenko K.A. et al. Stabilization of chain of integrators with arbitrary order in finite-time // 54th IEEE Conference on Decision and Control. 2015. P. 4637–4641.
9. Zimenko K.A. et al. Time-delay robustness analysis for systems with negative degree of homogeneity // Preprints of 10th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS). 2016. P. 558–563.
10. Zimenko K.A. et al. A note on delay robustness for homogeneous systems with negative degree // Automatica. 2017. Vol. 79. P. 178–184.



Золов Павел Дмитриевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем
E-mail: zolov_pd@corp.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ДРЕЙФА ПОТЕНЦИАЛА НУЛЕВОЙ ТОЧКИ В МНОГОУРОВНЕВОМ ИНВЕРТОРЕ С ФИКСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ ТОЧКОЙ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

П.Д. Золов

Научный руководитель – доцент В.С. Томасов

Целью данной статьи является исследование параметров энергоподсистемы следящего электропривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами, многоуровневой топологией инвертора и фиксированной нейтральной точкой. Обязательным требованием к современным прецизионным электроприводам различного назначения является высокое качество регулирования его координат: напряжения, тока (момента), скорости и положения. Высокое качество наведения должно обеспечиваться при глубоком регулировании выходного напряжения инвертора, необходимого для реализации широкого диапазона скоростей перемещения вращающейся оси телескопа (от 0 до 20 000 относительных единиц, где 20 000 – максимальная скорость перемещения привода) при малых значениях среднеквадратичных ошибок по положению (1-2 угл. сек.). В таких системах также необходимо обеспечивать плавность движения оптической оси телескопа на инфранизких скоростях слежения (до единиц угловых секунд за секунду) в условиях нелинейных искажений тока и выходного напряжения инвертора, вызванных импульсным режимом его работы. Поэтому применение многоуровневых схем инверторов напряжения, обеспечивающих более низкие значения коммутлируемых напряжений и объединяющих достоинства амплитудно-импульсной (АИМ) и широтно-импульсной модуляций (ШИМ) в системах прецизионного электропривода, имеет большие перспективы [1, 2]. Таким образом, кроме хорошо известных [3–5] преимуществ многоуровневых преобразователей, их применение в прецизионных системах следящего электропривода может позволить [2]:

- увеличить диапазон регулирования напряжения на нагрузке за счет реализации меньших значений коммутируемых напряжений, которые пропорциональны числу уровней;
- получить в нагрузке неискаженную форму тока, максимально приближенную к синусоидальной, а следовательно, и минимально возможные пульсации потокосцепления и момента электромашин;
- уменьшить падение напряжения на силовых модулях инвертора более низкого класса напряжения;
- снизить уровень излучаемых преобразователем электромагнитных помех за счет снижения уровня коммутируемого напряжения в любой момент времени.

Следует отметить, что для сервоприводов оптических телескопов характерны режимы реверса вращающихся осей при значительных маховых массах, что при обеспечении инвертором двухстороннего обмена энергией между электромашинной и звеном постоянного тока инвертора, вызывает большие перенапряжения в конденсаторах звена постоянного тока [6]. При использовании в качестве инвертора многоуровневой топологии с фиксированной нейтралью (рис. 1а), возникает проблема небаланса напряжений на последовательно соединенных конденсаторах силовых фильтров $C1$ и $C2$. В дальнейшем будем считать $C1 = C2 = const$. Явление небаланса напряжений происходит в силу следующих причин [7]:

- различие номиналов конденсаторов силового фильтра вследствие погрешности при изготовлении;
- несимметричная трехфазная нагрузка;
- режимы работы инвертора, при которых происходит неравномерное потребление энергии с конденсаторов силового фильтра.

Для обеспечения преобразования рекуперированной энергии в тепловую и выравнивания потенциала средней точки последовательного соединения конденсаторов посредством направления нейтрального тока в балластный резистор необходимо установить параллельно каждой емкости по индивидуальной балластной цепи. Ее структурная схема и подключение представлены на рис. 1б. На рис. 1в изображены: датчик напряжения (ДН) с гистерезисным элементом и транзисторный ключ с балластным сопротивлением $Rб$.

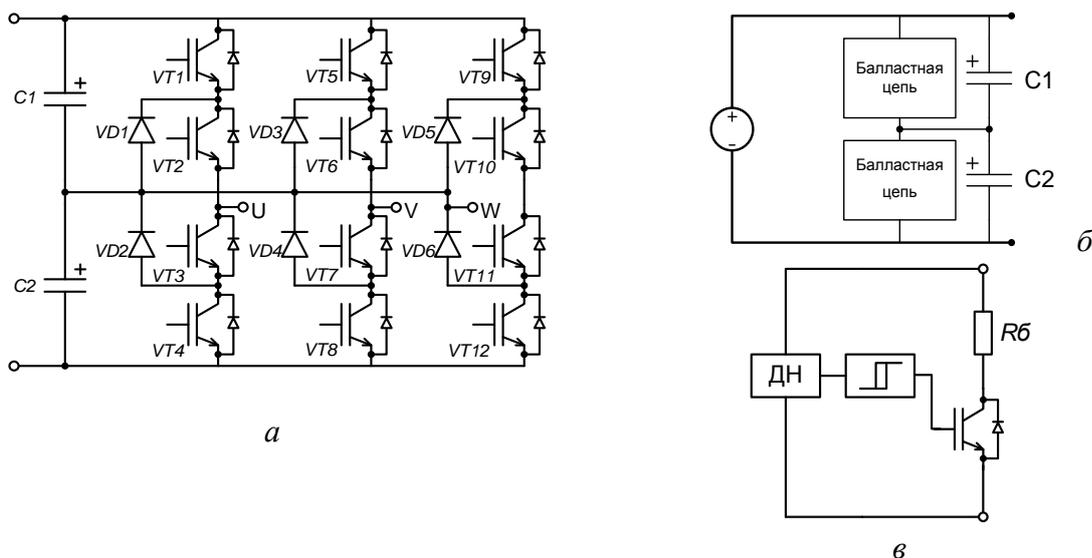


Рис. 1. а – топология многоуровневого инвертора с фиксированной нейтралью;
 б – структура звена постоянного тока многоуровневого инвертора;
 в – структура балластной цепи

Величина балластных сопротивлений определяется из условия возможности рассеяния определенной части рекуперированной энергии привода и возможности компенсации тока

нейтральной точки в момент потребления максимального тока нагрузкой. Предлагаемый алгоритм определения параметров элементов энергоподсистемы замкнутой системы электропривода с многоуровневым инвертором можно представить следующим образом:

- определение величины балластных сопротивлений, необходимой для обеспечения компенсации дрейфа потенциала средней точки источника питания;
- определение величины и мощности балластных сопротивлений, необходимых для приема определенной рекуперированной энергии [8].

Величина балластных сопротивлений выбирается минимальной из ранее определенных значений.

Определение сопротивления балластной цепи исходя из условия компенсации нейтрального тока

Описанные в исследовании [7] режимы работы электромеханической нагрузки с многоуровневым инвертором приводят к появлению нейтрального тока i_0 , который вызывает зарядные/разрядные процессы в конденсаторах силового фильтра. Его величина определяется величиной фазных токов в нагрузке и относительной продолжительностью подключения каждой из фаз к нейтральной точке [9].

$$i_0 = i_a d_{a0} + i_b d_{b0} + i_c d_{c0} \quad (1)$$

Здесь i_a, i_b, i_c – величины фазных токов в нагрузке, d_{a0}, d_{b0}, d_{c0} – относительная продолжительность подключения нагрузки к нейтральной точке в каждой фазе. Ее можно определить из величины относительного сигнала задания u_j (рис. 2) для трехуровневого инвертора, где j – название фазы (a, b, c – соответственно):

$$d_{j0} = \begin{cases} 1 - u_j, & (u_j \geq 0) \\ 1 + u_j, & (u_j < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$d_{j0} = 1 - |u_j|. \quad (3)$$

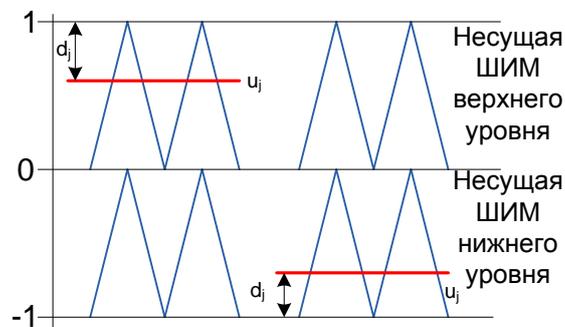


Рис. 2. Сигнал задания и пилообразный опорный сигнал трехуровневого инвертора

Сопротивление балластной цепи R_{bcalc} может быть рассчитано из критерия поддержания нулю скорости изменения напряжения на конденсаторе силового фильтра при заданном коридоре изменения ΔU_c и известной максимальной величины нейтрального тока i_0 (1), который определяется из режима работы электропривода. Учитывая, что напряжение на каждом из конденсаторов силового фильтра в трехуровневом инверторе равно половине напряжения в звене постоянного тока U_{dc} , минимальное напряжение на конденсаторах силового фильтра будет равно $\left(\frac{U_{dc}}{2} - \Delta U_c\right)$. Таким образом, расчетное соотношение для сопротивления балластной цепи R_{bcalc} принимает вид:

$$R_{bcalc} = \frac{U \frac{dc}{c} - \Delta U}{|i_0|} \quad (4)$$

Для определения величины максимального нейтрального тока i_0 (1) необходимо знать величины фазных токов и сигналов задания u_j для наиболее тяжелого режима работы электропривода. Если скорость вала двигателя изменяется по синусоидальному закону с заданными частотой ω_z и амплитудой Ω_m , то для угловой скорости можно записать:

$$\Omega(t) = \Omega_m \sin(\omega_z t), \quad (5)$$

Выражение для крутящего момента на валу двигателя определим исходя из второго закона Ньютона для вращательного движения. Угловое ускорение $\varepsilon(\omega_z t)$ получим, взяв производную от угловой скорости (5). Тогда:

$$M(t) = J \cdot \varepsilon(\omega_z t) = J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cos(\omega_z t) = M_{\max} \cos(\omega_z t). \quad (6)$$

где J – момент инерции, приведенный к ротору двигателя, а M_{\max} – амплитуда крутящего момента на валу двигателя. Таким образом, зная выражение для крутящего момента электрической машины, скорость вала которой изменяется по синусоидальному закону, можно определить амплитуду фазных токов. При синусоидальных противо-ЭДС крутящий момент СМПСМ постоянен на всем обороте ротора и зависит от амплитуды тока I_m :

$$I_m = \frac{2M_{\max}}{3c_e}. \quad (7)$$

$$i_a(t) = I_m \sin(p\alpha(t)),$$

$$i_b(t) = I_m \sin\left(p\alpha(t) - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (8)$$

$$i_c(t) = I_m \sin\left(p\alpha(t) + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Токи в фазах СПСМ в зависимости от угла поворота двигателя $\alpha(t)$ меняются по закону (8), где $\alpha(t)$ – угол поворота ротора СМПСМ, p – количество пар полюсов СПСМ. В момент времени $t = 0$, используя выражения (6), (7) и (8), получаем выражения для токов в фазах двигателя:

$$\begin{aligned} i_a(0) &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right), \\ i_b(0) &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c(0) &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Максимальный нейтральный ток в таком случае будет определен при электрическом угле поворота равно $\frac{\pi}{2}$. Тогда фазные напряжения на обмотках двигателя в момент времени $t = 0$ будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 U_a(0) &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right), \\
 U_b(0) &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right), \\
 U_c(0) &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right).
 \end{aligned} \tag{10}$$

При синусоидальной коммутации относительное задание по напряжению для каждой фазы инвертора при максимальном фазном напряжении, равном $\frac{U_d}{2}$, где U_d – напряжение в звене постоянного тока, вычисляется как:

$$\begin{aligned}
 u_a(0) &= \frac{4 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e \cdot U_d} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right), \\
 u_b(0) &= \frac{4 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e \cdot U_d} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right), \\
 u_c(0) &= \frac{4 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e \cdot U_d} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Итоговое выражение для нейтрального тока из выражений (1), (3) и (11) принимает вид:

$$\begin{aligned}
 i_0 &= \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left(1 - \left| \frac{4 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e \cdot U_d} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \right| \right) + \\
 &+ \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \left(1 - \left| \frac{4 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e \cdot U_d} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \right| \right) + \\
 &+ \frac{2 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z}{3 \cdot c_e} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \left(1 - \left| \frac{4 \cdot J \cdot \Omega_m \cdot \omega_z \cdot R_f}{3 \cdot c_e \cdot U_d} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \right| \right).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Таким образом, подставляя в уравнение (4) выражение для нейтрального тока (12), определяем значение балластного сопротивления, которое необходимо для регулирования напряжения на конденсаторах силового фильтра.

Моделирование

Введем следующие базовые величины:

- базовая скорость $\Omega b = \Omega ms$, где Ωms – скорость холостого хода двигателя;
- базовое напряжение $Ub = Udc$, где Udc – напряжение звена постоянного тока;
- базовый ток $Ib = Upb/Rph$, где $Upb = Ub/2$ – напряжение первой гармоники при синусоидальной ШИМ, Rph – фазное сопротивление обмотки двигателя;
- базовый момент $Tb = Ib \cdot Ct$, где Ct – конструктивный коэффициент машины;
- электромеханическая постоянная времени привода $Tm = J \Sigma^* \cdot \Omega b / Tb$, где $J \Sigma^*$ – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции нагрузки.

Система управления – двухконтурная система регулирования. Регулятор тока реализован в векторном виде, q -составляющая регулирует момент двигателя, d -составляющая (поток) поддерживается на нулевом уровне. Токковый контур настроен на апериодический закон, контур скорости настроен на оптимум по модулю. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4. На первом графике изображены кривые скорости и момента в относительных величинах, на втором – кривая нейтрального тока, относительно

величины базового тока I_b , на третьем графике изображены кривые напряжения на первом и втором конденсаторе, относительно величины базового напряжения U_b .

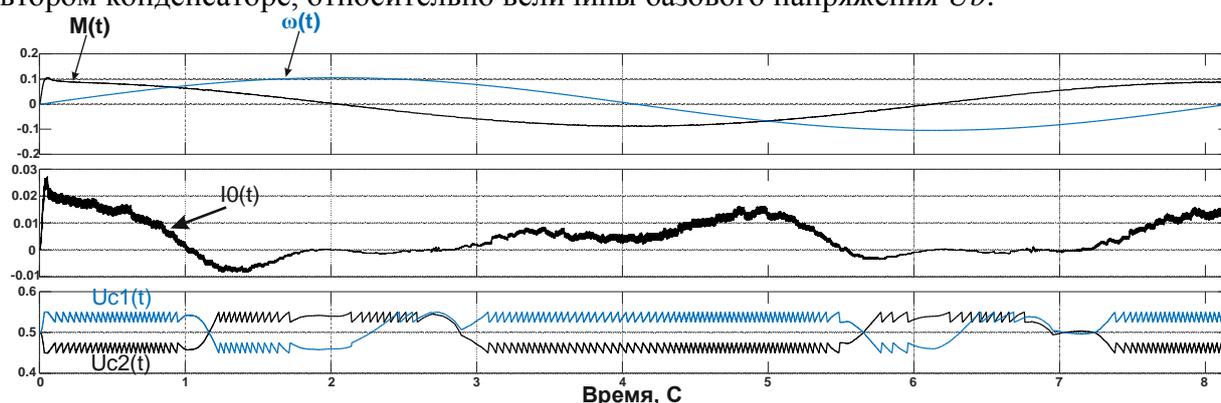


Рис. 3. Результаты моделирования

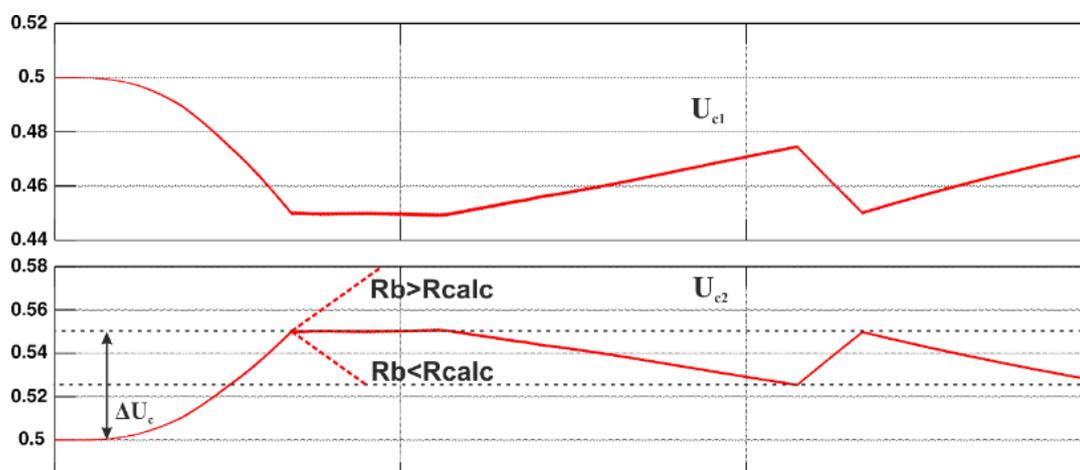


Рис. 4. Напряжения на конденсаторах силового фильтра и работа балластной цепи

Как видно из рис. 3, 4, напряжение на конденсаторах находится в пределах заданного изменения напряжения ΔU_c . При подключении балластного сопротивления к емкости силового фильтра в самом тяжелом режиме при пуске кривая напряжения согласно выбранному критерию имеет нулевую скорость изменения (рис. 4). На этом рисунке также представлены кривые напряжений при балластном сопротивлении, большем и меньшем расчетного:

- когда $R_b > R_{bcalc}$, напряжения на конденсаторах выходят за пределы регулирования;
- когда $R_b < R_{bcalc}$, напряжения находятся в пределах регулирования, но в этом случае появляется излишнее количество рассеиваемой энергии на балластной цепи.

Заключение и основные результаты

В работе выполнено исследование дрейфа напряжения на конденсаторах силового фильтра в многоуровневом инверторе с фиксированной нейтралью. Предложена система компенсации дрейфа с помощью балластных цепей. Для замкнутой системы электропривода, на базе синхронной машины с постоянными магнитами, работающей по синусоидальному заданию скорости получены аналитические выражения (4) и (12) для определения нейтрального тока и сопротивлений балластных цепей. Представлены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность системы компенсации и достоверность расчетных соотношений для балластных сопротивлений. Система компенсации и методика расчета могут использоваться в устройствах прецизионного электропривода,

с многоуровневыми топологиями инверторов, применяемых для достижения глубокого регулирования выходного напряжения.

Публикации

Zolov P.D., Tomasov V.S., Strzelecki R., Borisov P.A. Neutral point balancing technique for 3-level neutral point clamped converter with servo system // 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). 2017. P. 1–6.

Литература

1. Глазенко Т.А., Томасов В.С. Status and prospects of semiconductor converters implementation in instrument engineering // Известия вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39. № 6. С. 5–10.
2. Mikheev K.E., Tomasov V.S. Analysis of energy performance of multilevel semiconductor converters of electric drive systems // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2012. Vol. 12. No 1. P. 46–52.
3. Sadikov D.G. et al. Development of optimized control algorithm for cascaded multi-level inverter // Proceedings of the IX International Conference on Power Drives Systems. 2016. P. 292–295.
5. Voronin I.P. et al. Problems of practical application of a three-level neutral-point clamped inverter circuit // Proceedings of the IX International Conference on Power Drives Systems. 2016. P. 266–269.
6. Томасов В.С. и др. Методика анализа электромагнитных процессов энергоподсистемы электропривода постоянного тока в режиме рекуперации // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 6. С. 1–6.
7. Wu B., Narimani M. High-power converters and AC drives. New Jersey, 2006. – 480 p.
8. Egorov A.V. et al. Method of braking circuit resistance estimation for closed loop drive system with big rotating masses in speed reverse operating mode with current limitation // Proceedings of the IX International Conference on Power Drives Systems. 2016. P. 1–5.
9. Gong B. et al. Simple three-level neutral point voltage balance control scheme based on carrier overlapping SPWM // Electrical Review. 2012. Vol. 88. No 12a. P. 305–309.



Ильина Ксения Викторовна
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра вычислительной техники
E-mail: kse1920@yandex.ru

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С КОНТЕНТНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

К.В. Ильина

Научный руководитель – доцент А.М. Дергачев

В настоящее время стремительно развиваются рекомендательные системы. Они представляют собой программный комплекс, который определяет и распознает интересы и предпочтения пользователей, формируя в соответствии с ними определенные подборки. На данный момент популярностью пользуются, например, такие рекомендательные системы,

как *Amazon*, *Netflix*, *Last.fm*, *Forsquare*. Одним из основных подходов, используемых для генерации рекомендаций, можно считать контентную фильтрацию, или фильтрацию на основе содержания.

В результате использования предсказаний, которые дает рекомендательная система, сервис автоматически подстраивается под поведение конкретного пользователя (персонализация). Многие рекомендательные системы широко используются в коммерческой индустрии.

Объектом настоящего исследования стала эффективность анализа данных в рекомендательных системах.

Цель работы – определение требований и проектирование рекомендательной системы с контентной фильтрацией, обеспечивающей точные рекомендации, основанные на знаниях о пользователе.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- сравнить различные существующие рекомендательные сервисы;
- выполнить обзор способов хранения собранных данных;
- исследовать алгоритмы контентной фильтрации, применяемые для подбора рекомендаций;
- выбрать наиболее подходящее для разрабатываемой системы хранилище данных;
- спроектировать структуры разрабатываемой рекомендательной системы.

В процессе выполнения работы проведено изучение литературы в области рекомендательных систем, в том числе систем, использующих алгоритмы контентной фильтрации. Выполнен обзор сервисов, предназначенных для формирования рекомендаций. Проведен сравнительный анализ способов хранения данных в рекомендательных системах. Путем обобщения полученных данных сформулированы основные особенности разрабатываемой системы.

При создании рекомендательной системы чаще всего используется два типа фильтрации: коллаборативная и контентная. Кроме того, существует подход, объединяющий их особенности, – гибридная фильтрация [1].

В рекомендательных системах с фильтром по содержанию (контентная фильтрация) рекомендации формируются на основе поведения пользователей и не зависят от других участников системы. Для генерации рекомендаций система обращается к профилю пользователя, где в определенном формате хранятся данные о его интересах и предпочтениях. Кроме того система использует информацию обо всех объектах, которые могут быть рекомендованы [2].

На основании анализа достоинств и недостатков существующих приложений, формирующих рекомендации, были сформулированы особенности разрабатываемого сервиса. К ним относятся:

- наличие профиля пользователя, в котором хранится информация о его интересах, истории работы с системой, оценках и рейтингах;
- поиск и фильтрация по существующему контенту на основе ключевых слов;
- возможность оценки и комментария существующего контента;
- наличие информации о существующем контенте в неструктурированном виде, возможность добавления этой информации при загрузке нового контента;
- возможность получения рекомендаций без большого количества зарегистрированных пользователей;
- сбор данных и обеспечение обратной связи от пользователя для поддержания актуального профиля пользователя.

Чем больше данных было получено и доступно для алгоритмов, тем точнее будут рекомендации. Большинство сервисов рекомендаций работают с большими объемами данных. Выбор конкретного хранилища будет зависеть от данных, на основе которых

генерируются рекомендации. Такими хранилищами могут быть базы данных *NoSQL*, реляционные базы данных или хранилища объектов.

Разрабатываемая система для хранения данных будет использовать *NoSQL*-подход, который объединяет большое количество различных технологий баз данных. Их разрабатывают в ответ на предъявляемые к созданию современных приложений требования.

NoSQL-решение было выбрано на основании следующих характеристик [3]:

- отсутствие лишних усложнений (традиционные *SQL*-базы данных обеспечивают их строгую консистентность);
- высокая пропускная способность;
- неограниченное горизонтальное масштабирование (например, добавление узлов в кластере, которое не влияет на работоспособность системы).

Процесс генерации рекомендаций в таких системах обычно осуществляется в четыре этапа: сбор данных, хранение, анализ и формирование. В этом процессе важным является каждый шаг: от получения информации до представления ее пользователю. Так от собранной информации зависят алгоритмы, которые могут быть применены в рекомендательных системах. Некорректно работающая система будет неправильно предоставлять советы пользователям.

Любой этап в различных системах рекомендаций организуется в зависимости от требований. Разрабатываемая рекомендательная система должна состоять из следующих элементов:

- интерфейсная часть – часть системы, которая отвечает за сбор различного типа данных о пользователе;
- хранилище данных – часть системы, куда в несколько этапов (экспорт, импорт и преобразование) происходит загрузка собранных данных. Оно должно быть доступно для платформы машинного обучения;
- платформа машинного обучения – часть системы, которая исследует и анализирует собранные данные и подбирает подходящие рекомендации. На этом этапе, как правило, используются следующие алгоритмы обучения: деревья принятия решений, метод ближайших соседей, релевантная обратная связь, линейные классификаторы и вероятностные методы;
- дополнительное хранилище – часть системы, которая будет применяться клиентской стороной в реальном времени для предоставления рекомендаций.

Для хранения и анализа данных выбрана связка *ElasticSearch – Hadoop. Elasticsearch*. Это распределенный, основанный на *JSON* механизм поиска и анализа, предназначенный для горизонтального масштабирования, максимальной надежности и простоты управления [4].

Hadoop используется как система пакетной обработки результатов, которая довольно сложна в режиме реального времени. Для интерактивного обнаружения информации *ES – Hadoop* позволяет индексировать данные *Hadoop* в *Elastic Stack*, чтобы в полной мере использовать быстрый механизм поиска и анализа *Elasticsearch* и визуализации *Kibana*.

С помощью *ES – Hadoop* можно просто создавать динамические встроенные поисковые приложения, чтобы обрабатывать данные, хранящиеся в *Hadoop*, или выполнять глубокую аналитику с низкой задержкой, используя полнотекстовые, геопространственные запросы и агрегации.

Hadoop и *Elasticsearch* используются в связке для того, чтобы используя функции друг друга, осуществлять мониторинг и пакетную аналитику в реальном времени.

Заключение

В результате выполнения работы были определены основные требования к разрабатываемой системе, спроектирована ее структура, а также найден алгоритм контентной фильтрации.

Предложенная система может быть использована для предоставления актуальных конкретному пользователю рекомендаций, которые формируются на основе его поведения и не учитывают поведения других участников системы. Для генерации рекомендаций система обращается к профилю пользователя, где в определенном формате хранится информация о его интересах и предпочтениях. Кроме того, система может анализировать данные обо всех объектах, которые могут быть рекомендованы.

Алгоритм формирования рекомендаций в перспективе можно усовершенствовать путем анализа информации о схожих по характеристикам и поведению пользователей.

Публикации

1. *Ильина К.В.* Система игрового обучения программированию с возможностью интеграции приложений // Двдцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. СПб., 2015. С. 142.
2. *Ильина К.В.* Сравнительный анализ методов и средств автоматизации функционального тестирования // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 65–67.
3. *Ильина К.В.* Система игрового обучения программированию с возможностью интеграции приложений // Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга. СПб., 2016. С. 83–86.
4. *Ильина К.В.* Игровая программная платформа для обучения основам программирования [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2931/2931.pdf> (дата обращения: 30.10.17).
5. *Ильина К.В.* Игровая программная платформа для обучения основам программирования // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров Университета ИТМО. СПб., 2016. С. 152–155.
6. *Ильина К.В., Дергачев А.М.* Игровая программная платформа для обучения основам программирования // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 2. СПб., 2016. С. 230–232.
7. *Ильина К.В.* Контентная фильтрация в рекомендательных системах [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5102/5102.pdf> (дата обращения: 30.10.17).

Литература

1. *Jannach D. et al.* Recommender system: an Introduction. Cambridge, 2011. – 353 p.
2. *Gorakala S.K., Usulli M.* Building a recommendation system with R. Birmingham, 2015. – 247 p.
3. NoSQL [Electronic resource]: official website. URL: <http://nosql-database.org/> (accessed: 01.11.17).
4. Elasticsearch tutorial: creating an index and querying [Electronic resource] // Tests4Geeks Blog. URL: <https://tests4geeks.com/elasticsearch-tutorial/> (accessed: 14.11.17).



Камалиева Айсылу Насыховна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: aisylu.kamaliewa@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В НАНОФОТОНИКЕ

А.Н. Камалиева

Научный руководитель – старший научный сотрудник Т.А. Вартанян

Введение

Кремний играет важную роль в развитии нанотехнологий, служит мощным материалом как для фундаментальных исследований, так и для практического применения. Кремниевые наноструктуры демонстрируют уникальные оптические, электрические и даже химические свойства, благодаря которым находят широкое применение в электронике при создании транзисторов, чипов памяти, литиевых батареек; в оптоэлектронике – при создании светоизлучающих диодов, световодов, солнечных элементов; в биомедицине для диагностики и лечения заболеваний. Отличие оптических свойств кремниевых наноструктур от свойств объемного материала открывает большие возможности для приложений в области фотоники [1–8].

Оптические свойства кремниевых наноструктур определяются возможностью возбуждения в них резонансов Ми в видимом диапазоне. Резонансные длины волн зависят от размеров и формы наночастиц. В связи с этим особый интерес приобретает разработка методов создания кремниевых наноструктур, детальное изучение их свойств, а также поиск путей их модификации.

Существуют несколько методов создания кремниевых наноструктур: фемтосекундная лазерная абляция, лазерно-индуцированный перенос, электронно-лучевая литография и фотолитография, импринт-литография, химический синтез и наносферная литография [9–14].

В данной работе рассматривается два метода создания кремниевых наноструктур. Первый основан на комбинации методов высоковакуумного напыления и металл-стимулированного химического травления (МСХТ) [15]. Второй метод – обратная химическая литография (*lift-off*), которая включает высоковакуумное напыление фоторезиста и основного материала, а также химическое травление.

Эти два метода объединяет то, что в обоих используются наночастицы серебра в качестве промежуточного материала, необходимого для травления, и напыленная кремниевая тонкая пленка. Для создания кремниевых наноструктур, ориентированных для приложений нанопотоники, комбинация таких подходов является оригинальной.

Высоковакуумное напыление

Кремниевые тонкие пленки были получены методом термического осаждения материала на кварцевые подложки в вакуумной камере *Kurt J. Lesker (PVD 75)* при давлении остаточных газов порядка 10^{-7} Торр. На рис. 1а представлено изображение со сканирующего электронного микроскопа напыленной тонкой кремниевой пленки. Толщина кремниевой пленки измерялась с помощью эллипсометрии. На ее поверхность в той же вакуумной камере напылялось серебро, эквивалентная толщина пленки которого определялась с помощью кварцевого измерителя толщины и составляла 15 и 20 нм. Для получения

островковой структуры образцы кремния с нанесенной серебряной пленкой подвергались термическому отжигу в течение двух часов при 220 °С, что приводило к распаду серебряной пленки на отдельные гранулы. Температура плавления кремния намного выше, чем у серебра, поэтому отжигу подвергалась только серебряная пленка.

Металл-стимулированное химическое травление

Для создания кремниевых нанодоверстий был выбран метод металл-стимулированного химического травления. По сравнению с другими он позволяет делать образцы больших размеров. Серебро в данном методе служит в качестве катализатора. Размер и форма нанодоверстий зависят от размера и формы серебряной наночастицы. В свою очередь, глубина нанодоверстий определяется временем, в течение которого образец держится в травящем растворе.

Кремниевая пленка с серебряными наночастицами на поверхности (рис. 1б), погружалась в смесь водных растворов плавиковой кислоты и перекиси водорода. В растворе под наночастицами серебра образовывалось соединение кремния, которое стравливалось, и частицы серебра, служащие катализатором, погружались вертикально вниз вглубь кремниевого слоя (рис. 1в). Так были сформированы массивы кремниевых нанодоверстий. Для удаления серебра после окончания процесса каталитического травления образцы помещались в водный раствор HNO_3 (рис. 1г).

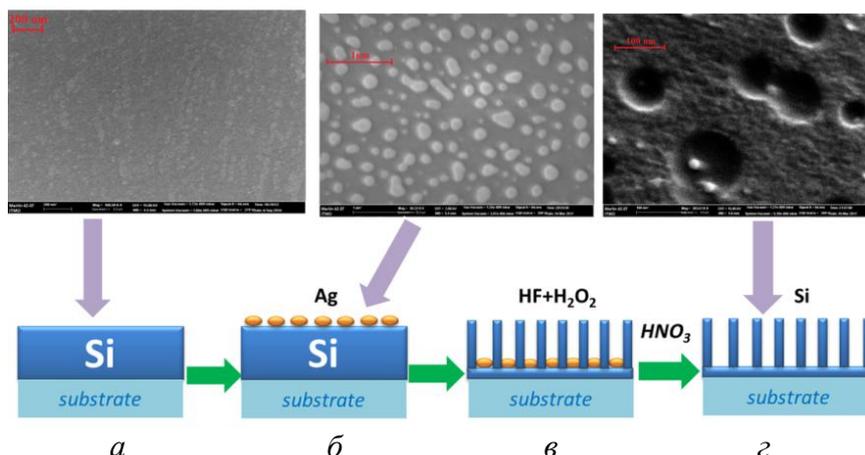


Рис. 1. Схематическое представление метода травления кремния

Обратная химическая литография

Второй метод создания кремниевых наноструктур, который был разработан, – обратная химическая литография (*lift-off*). Уникальным является то, что в данном методе в качестве фоторезиста (временного материала) использовались отожженные наночастицы серебра, а в качестве основного материала – тонкие кремниевые пленки.

Схематически процесс создания кремниевых «нанокубиков» представлен на рис. 2. На первом этапе на поверхность кварцевой подложки в вакуумной камере напыляется серебро, которое затем подвергается термическому отжигу. На втором этапе на поверхность серебра в той же вакуумной камере напыляется тонкий слой кремния. Третий этап – этап травления. Образец с тонким кремниевым слоем на поверхности серебряных наночастиц погружается в водный раствор гидроксида аммония. В результате наночастицы серебра отрываются от поверхности подложки, и остается только та часть кремния, которая присоединена непосредственно к подложке. На основе такого метода были получены кремниевые «нанокубики».

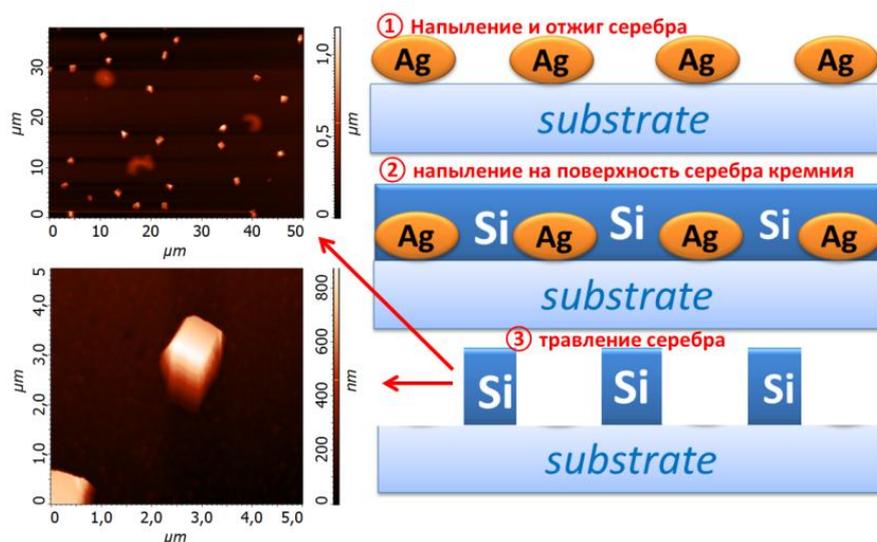


Рис. 2. Схематическое представление метода получения кремниевых «нанокубиков»

Основные результаты работы

На рис. 3 представлены изображения со сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и атомно силового микроскопа (АСМ) кремниевых нанотверстий, полученных путем комбинации методов высоковакуумного напыления и метал-стимулированного химического травления. Анализ СЭМ- и АСМ-изображений показал, что в кремниевой тонкой пленке при использовании островковой серебряной структуры с эквивалентной толщиной 15 нм образуются нанотверстия диаметром около 100 нм и глубиной 50 нм (рис. 3а). При эквивалентной толщине островковой пленки 20 нм образуются нанотверстия диаметром около 200 нм и глубиной 80 нм (рис. 3б).

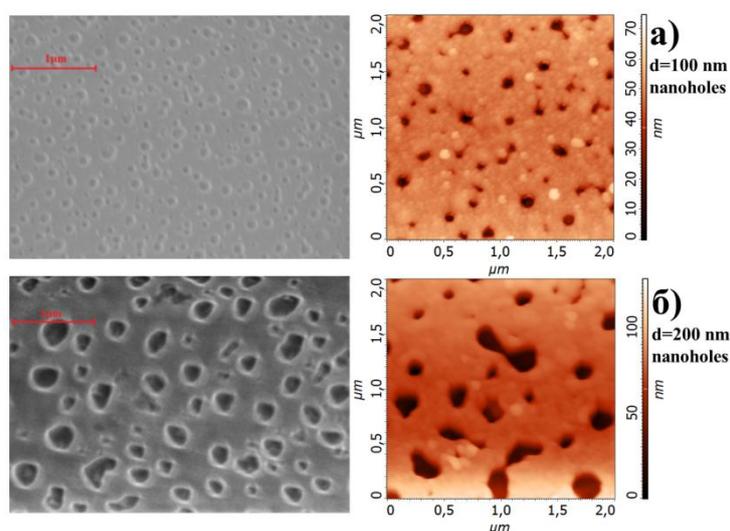


Рис. 3. СЭМ- и АСМ-изображения кремниевых пленок с нанотверстиями размером: а – около 100 нм; б – 200 нм

На рис. 4 представлены измеренные спектры пропускания и отражения кремниевых пленок с нанотверстиями диаметром 100 нм (рис. 4а) и 200 нм (рис. 4). В длинноволновой области, примерно до 550 нм, где поглощение кремния невелико, в спектрах отражения и пропускания отчетливо видны обусловленные интерференцией противофазные максимумы и минимумы. На длинах волн короче 550 нм поглощение кремния становится значительным и пропускание даже таких тонких пленок быстро падает до нуля. Одновременно с этим прекращаются и осцилляции в спектрах отражения. Отношение оптических толщин пленок,

оцененное по положениям минимумов в спектрах отражения составило 1,7, что близко к оценке по данным эллипсометрии.

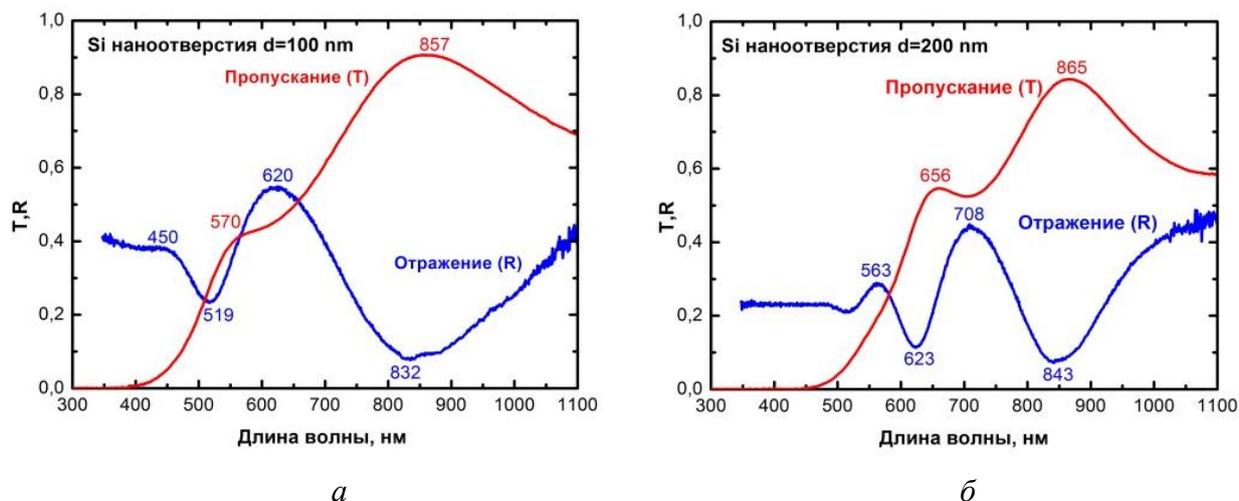


Рис. 4. Спектры пропускания и отражения, кремниевых пленок с нанодоотверстиями диаметром: а – 100 нм; б – 200 нм

Спектры комбинационного рассеяния кремниевых пленок с нанодоотверстиями сильно отличаются от спектров комбинационного рассеяния объемного кремния (рис. 5).

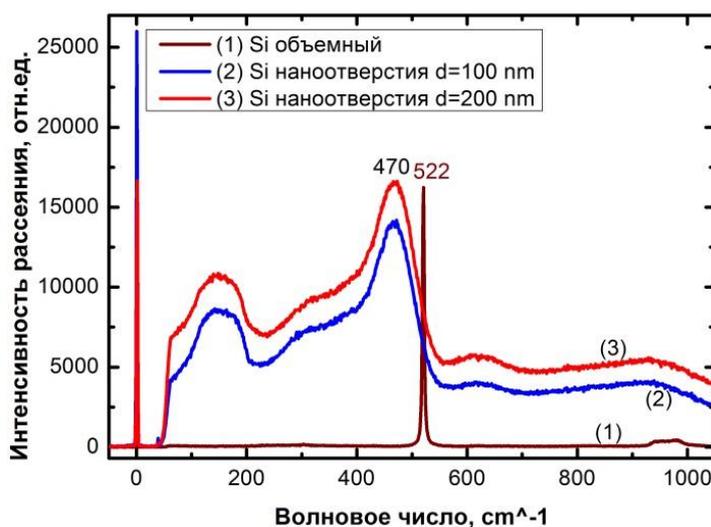


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния: сплошной пленки кремния (1); пленки кремния с диаметром нанодоотверстий 100 нм (2) и 200 нм (3)

Так в спектрах комбинационного рассеяния кремниевых нанодоотверстий наблюдается сдвиг на 53 нм в низкочастотную область, а также уширение фоннного пика. Сдвиг и уширение фоннного пика вероятно связаны с образованием нанодоотверстий кремния.

Заклучение

В данном проекте разработано два довольно простых метода создания кремниевых наноструктур, а именно нанодоотверстий и «нанокубиков».

Путем комбинации методов высоковакуумного напыления и металл-стимулированного химического травления были получены кремниевые нанодоотверстия диаметром около 100 и 200 нм и глубиной около 50 и 80 нм соответственно.

Методом обратной химической литографии были получены кремниевые «нанокубики» размером 500 нм.

Исследованы спектры пропускания и отражения полученных кремниевых наноструктур.

Публикации

1. Камалиева А.Н. Разработка методов создания массивов наночастиц кремния и комплементарных к ним пористых наноструктур [Электронный ресурс] // Сборник тезисов и докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5247/5247.pdf> (дата обращения: 12.02.2018).
2. Kamaliev A.N., Toropov N.A., Vartanyan T.A. Fabrication of silicon nanostructures for applications in photonics // 25th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology". Proceedings. Saint-Petersburg, 2017. P. 274–275.
3. Камалиева А.Н., Торопов Н.А., Баранов М.А., Богданов К.В. Разработка методов создания кремниевых наноструктур // Сборник трудов X Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2017». СПб., 2017. С. 21–22.

Литература

1. Shcherbachev M.R. et al. Ultrafast all-optical switching with magnetic resonances in nonlinear dielectric nanostructures // Nano Letters. 2015. Vol. 15. No 10. P. 6985–6990.
2. Baranov D.G. et al. Tuning of near- and far-field properties of all-dielectric dimer nanoantennas via ultrafast electron-hole plasma photoexcitation // Laser and Photonics Reviews. 2016. Vol. 10. No 6. P.1009–1015.
3. Jeong S. et al. Hybrid silicon nanocone-polymer solar cells // Nano Letters. 2012. Vol. 12. No 6. P. 2971–2976.
4. Cao A. et al. Silicon nanowire-based devices for gas-phase sensing // Sensors. 2014. Vol. 14. No 1. P. 245–271.
5. Garnett E., Yang P. Light trapping in silicon nanowire solar cells // Nano Letters. 2010. Vol. 10. No 3. P. 1082–1087.
6. Kelzenberg M.D. et al. Enhanced absorption and carrier collection in Si wire arrays for photovoltaic applications // Nature Materials. 2010. Vol. 9. P. 239–244.
7. Zamfir M.R. et al. Silicon nanowires for Li-based battery anodes: a review // Journal of Materials Chemistry A. 2013. Vol. 1. No 34. P. 9566–9586.
8. Kuznetsov A.I. et al. Optically resonant dielectric nanostructures // Science. 2016. Vol. 354. No 6314. P. aag 2472.
9. Kuznetsov A.I. et al. Magnetic light // Scientific Reports. 2012. Vol. 2. P. 492.
10. Zywiets U. et al. Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses // Nature Communications. 2014. Vol. 5. P. 3402.
11. Cao L. et al. Tuning the color of silicon nanostructures // Nano Letters. 2010. Vol. 10. No 7. P. 2649–2654.
12. Spinelli P. et al. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators // Nature Communications. 2012. Vol. 3. P. 692.
13. Shi L. et al. Monodisperse silicon nanocavities and photonic crystals with magnetic response in the optical region // Nature Communications. 2013. Vol. 4. P. 1904.
14. Moitra P. et al. Large-scale all-dielectric metamaterial perfect reflectors // ACS Photonics. 2015. Vol. 2. No 6. P. 692–698.
15. Huang Z. et al. Metal-assisted chemical etching of silicon: a review // Advanced Materials. 2011. Vol. 23. No 2. P. 285–308.



Коннов Кирилл Александрович
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра световодной фотоники
E-mail: kirillkonnov1991@gmail.com

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК БРЭГГА С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

К.А. Коннов

Научный руководитель – доцент С.В. Варжель

Цель проекта – разработка чувствительного элемента волоконно-оптического датчика (ВОД) температуры повышенной точности на основе решеток Брэгга с фазовым сдвигом. Для достижения результата осуществлен подбор оптимальных параметров записи волоконных брэгговских решеток (ВБР) в интерферометре Тальбота и создана методика внесения в них фазового сдвига. После проведения температурных испытаний полученные чувствительные элементы будут применены в конструкции высокоточных ВОД температуры.

Одной из основных задач, которую необходимо решить при разработке ВОД температуры на основе ВБР, является повышение точности измерения контролируемого параметра. Сделать это можно, применяя в качестве чувствительного элемента датчик ВБР с фазовым сдвигом (ВБР с π -сдвигом). На рис. 1 приведены модели локализации стандартной решетки и решетки с π -сдвигом.

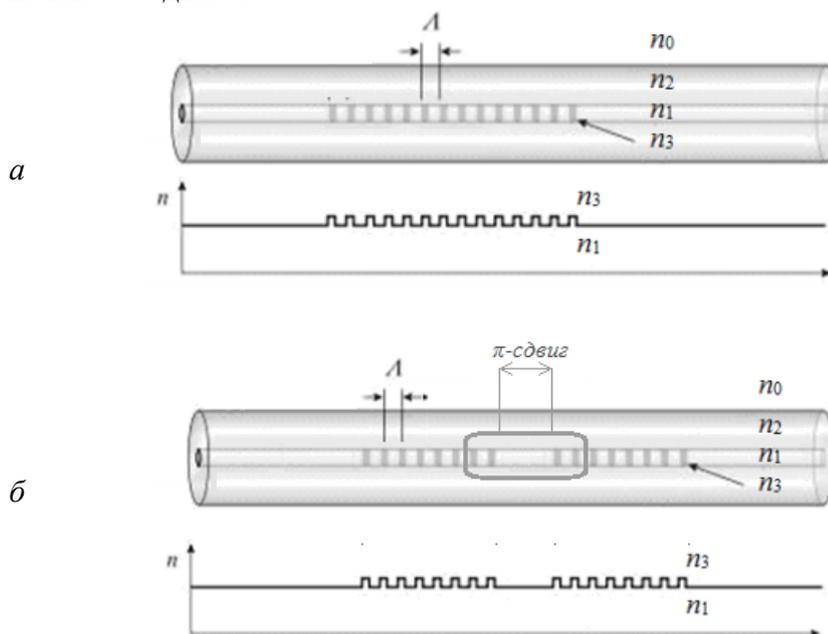


Рис. 1. Модель ВБР: а – стандартной; б – с фазовым сдвигом

На рис. 2 приведены модели спектров отражения стандартной ВБР и ВБР π -сдвигом [1].

Запись волоконных решеток Брэгга с π -сдвигом позволяет выделить в спектре отражения узкую полосу пропускания (до нескольких пм) [2], что способствует увеличению разрешающей способности датчиков, в которых они применяются.

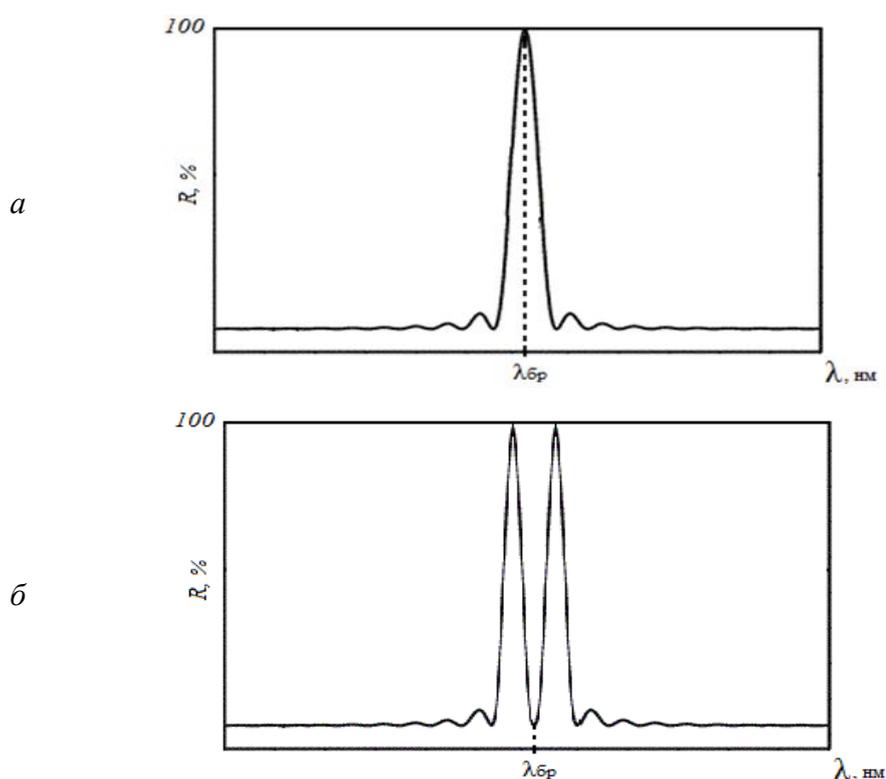


Рис. 2. Модель спектра отражения ВБР: а – стандартной; б – с фазовым сдвигом

В настоящее время используются три основных метода записи ВБР: фазовой маски, записи в интерферометре Тальбота и пошаговый. Запись интерферометрическим методом позволяет осуществлять более гибкий подбор параметров и характеристик ВБР [3]. В связи с этим для выполнения проекта подошла именно такая методика.

В процессе работы в качестве источника ультрафиолетового излучения (УФ) использовалась *KrF*-эксимерная лазерная система *Optosystems MOPA CL-7550* с номинальной энергией в импульсе 250 мДж и повышенной временной и пространственной когерентностью. УФ-излучение фокусируется цилиндрической линзой и попадает на фазовую маску. Далее излучение $+1$ и -1 порядков дифракции направляется на закрепленные на поворотных подвижках зеркала, которые сводят пучки в область расположения оптического волокна, где и образуется интерференционная картина. Для увеличения плотности энергии записывающего излучения в схему перед фазовой маской вносится цилиндрическая линза, сводящая пучок в необходимой плоскости. Поворот зеркал на подвижках позволяет осуществлять достаточно точный подбор длины волны брэгговского резонанса ВБР. Для изменения длины записываемых решеток в схему перед оптическим волокном вносится регулируемая щель. Схематическое изображение установки, примененной в ходе реализации работы для записи ВБР в интерферометре Тальбота, представлено на рис. 3.

Следующим этапом после записи ВБР с требуемыми параметрами является внесение в нее фазового сдвига. Для реализации этой процедуры была выбрана методика воздействия на световедущую часть оптического волокна электрической дуги сварочного аппарата, которая изменяет его физические параметры. В ходе выполнения работы было использовано два варианта внесения фазового сдвига: в центре одной и между двумя ВБР.

Спектры отражения ВБР с π -сдвигом, полученные воздействием электрической дуги сварочного аппарата на центр одиночной решетки, представлены на рис. 4. Пунктирная линия на них соответствует ВБР до внесения фазового сдвига, сплошная – после.

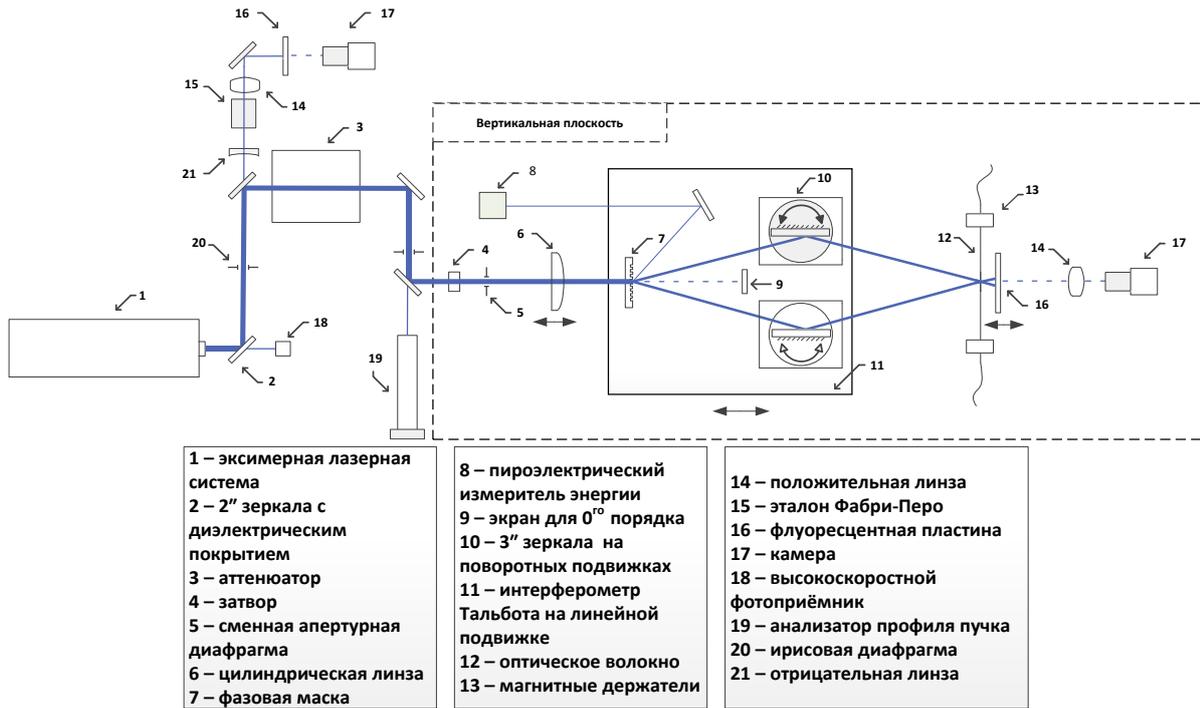


Рис. 3. Схематическое изображение установки для записи ВБР

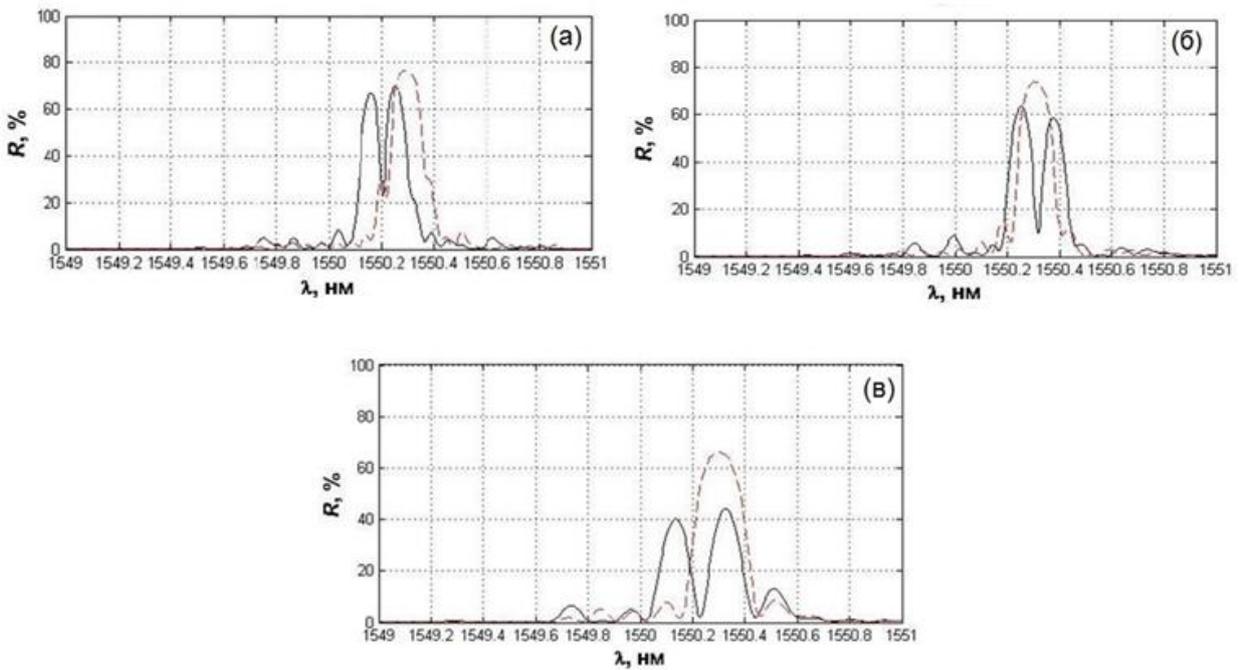


Рис. 4. Спектры отражения для ВБР с введением фазового сдвига в центре одной ВБР: а – длина решетки – 14 мм, ширина на полувысоте – 28 нм; б – длина решетки – 10 мм, ширина на полувысоте – 40 нм; в – длина решетки – 6 мм, ширина на полувысоте – 76 нм

Сдвиг резонансной длины волны в коротковолновую область после внесения фазового сдвига обусловлен тем, что при записи ВБР оптическое волокно находится в некотором натяжении. В момент внесения фазового сдвига натяжение отсутствует. Снижение коэффициента отражения ВБР после внесения фазового сдвига возникает ввиду того, что у решеток с π -сдвигом вместо максимума в центре спектра отражения наблюдается узкополосный спад.

Спектры отражения ВБР с π -сдвигом, полученные воздействием электрической дуги сварочного аппарата между двумя решетками, представлены на рис. 5. На данных спектрах красная линия соответствует ВБР до внесения фазового сдвига, черная – после.

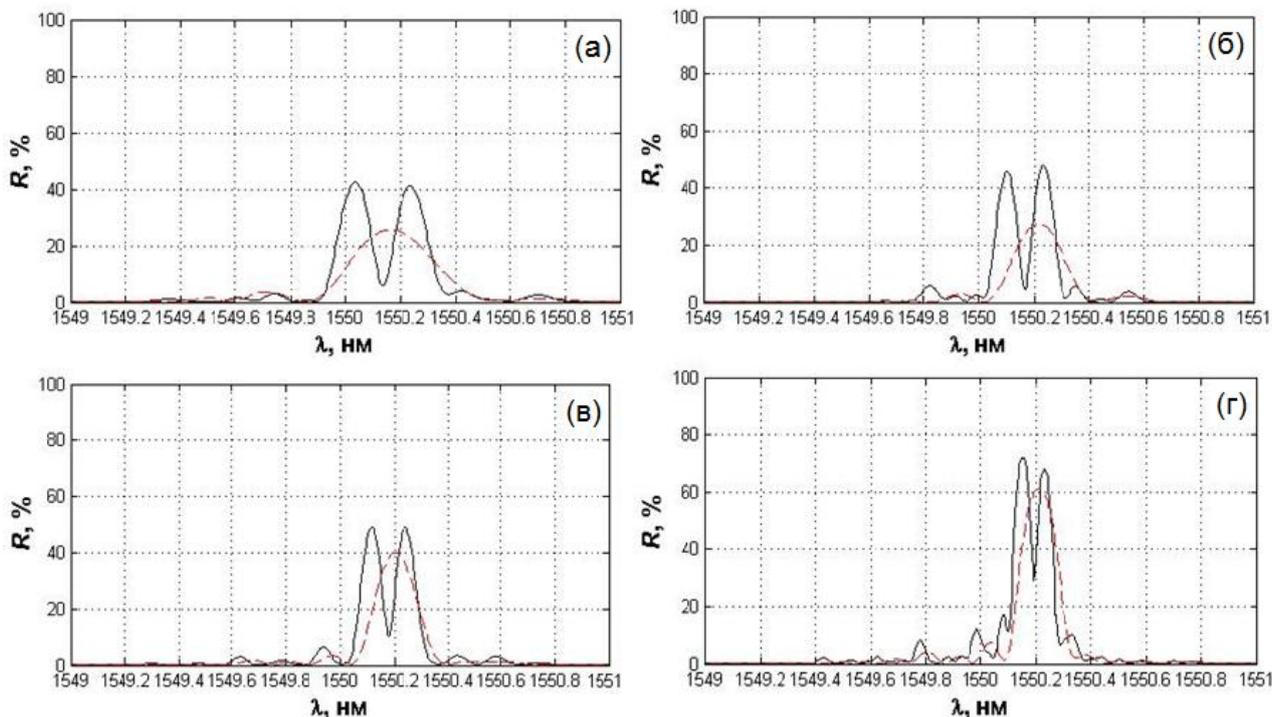


Рис. 5. Спектры отражения для двух ВБР с введением фазового сдвига между ними:
 а – длина решетки – $2 \times 2,5$ мм, ширина на полувысоте – 84 нм; б – длина решетки – 2×4 мм,
 ширина на полувысоте – 56 нм; в – длина решетки – 2×5 мм, ширина на полувысоте – 52 нм;
 г – длина решетки – 2×7 мм, ширина на полувысоте – 28 нм

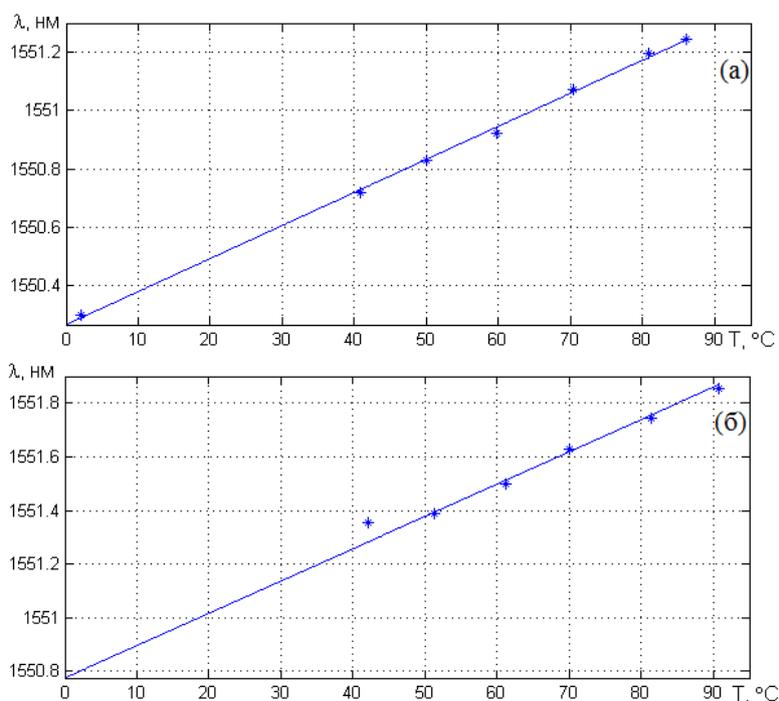


Рис. 6. Зависимость длины волны брэгговского резонанса от температуры для:
 а – одной ВБР с π -сдвигом, длина решетки – 5 мм; б – двух ВБР с π -сдвигом, длина
 решетки – 2×5 мм, расстояние между ними – 2 мм

Завершающим этапом реализации проекта являлось проведение температурных испытаний полученных чувствительных элементов. Образцы ВБР помещались в термокамеру, где осуществлялось плавное изменение температуры с шагом 10 °С, а с помощью спектроанализатора (диапазон измерений 600–1700 нм, разрешающая способность – 20 пм) регистрировались изменения их спектра отражения. Снятие спектров осуществлялось при нулевом значении температуры, а далее в диапазоне от 40 до 90 °С (измерения на 10, 20 и 30 °С не проводились из-за меньшей стабильности термокамеры при температурах, близких к комнатной). Результаты измерений представлены на рис. 6.

На приведенных графиках представлена зависимость длины волны брэгговского резонанса ВБР от температуры. Отклонения от прямой зависимости связаны с нестабильностью работы термокамеры. Представленные выше данные говорят о том, что при увеличении температуры окружающей среды происходит сдвиг центральной длины волны брэгговского резонанса ВБР с π -сдвигом.

Заключение

В ходе исследования подобраны оптимальные параметры записи ВБР для дальнейшего получения решеток с π -сдвигом. Разработан и создан чувствительный элемент волоконно-оптического датчика температуры повышенной точности на основе решеток Брэгга с фазовым сдвигом, а также проведены его температурные испытания.

На основании описанных выше результатов можно сделать вывод о возможности применения полученных образцов ВБР с π -сдвигом в качестве чувствительного элемента датчика температуры повышенной точности. Такие устройства могут быть применены в различных приборах и системах с необходимостью контроля температурных параметров в режиме реального времени и с высокой точностью. Кроме того, полученные ВБР с π -сдвигом могут быть применены при разработке датчиков и систем мониторинга других физических величин (механических напряжений, давления и т. д.).

Публикации

1. *Gribaev A.I., Varzhel' S.V., Petrov A.A., Palandzhyan D.A., Konnov K.A.* Visualization of fiber Bragg gratings of type II induced by radiation of an ArF excimer laser in an anisotropic single-mode optical fiber with an elliptical stress cladding // *Optics and Spectroscopy*. 2017. Vol. 123. No 1. P. 172–176.
2. *Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel' S.V., Konnov K.A.* Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. Vol. 48. No 12. P. 540.
3. *Varzhel' S.V., Mun'ko A.S., Konnov K.A., Gribaev A.I., Kulikov A.V.* Recording Bragg gratings in hydrogenated birefringent optical fiber with elliptical stress cladding // *Journal of Optical Technology*. 2016. Vol. 83. No 10. P. 638–641.
4. *Mun'ko A.S., Varzhel' S.V., Arkhipov S.V., Gribaev A.I., Konnov K.A., Belikin M.N.* The study of the thermal annealing of the Bragg gratings induced in the hydrogenated birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012015–012015-6.
5. *Varzhel' S.V., Petrov A.A., Gribaev A.I., Palanjyan D.A., Konnov K.A.* High-performance fiber Bragg gratings exposed by a single 17-ns excimer laser pulse in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // *Proceedings of SPIE*. 2013. Vol. 9065. P. 90650H.

Литература

1. *Yoshino T. et al.* Fiber-Bragg-grating based single axial mode Fabry-Perot interferometer and its strain and acceleration sensing applications // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. Vol. 34. No 9. P. 2241–2250.

2. Berger N.K. et al. Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating // Optics Express. 2007. Vol. 15. No 2. P. 371–381.
3. Васильев С.А. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.



Кочегарова Татьяна Сергеевна
Факультет технологического менеджмента и инноваций
Кафедра финансового менеджмента и аудита
E-mail: kochegarova.ts@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЕНЧМАРКИНГА

Т.С. Кочегарова

Научный руководитель – доцент В.В. Негреева

Цель проекта – разработка методических основ и научно-обоснованных подходов к проблеме эффективного функционирования промышленного предприятия, а также выявление направлений развития концепции технологического бенчмаркинга в формировании системы эффективного функционирования.

В рамках проведенного исследования выявлено, что на пути к инновационному и устойчивому развитию экономики одним из значимых барьеров является износ технико-технологической базы. Внедрение наилучших доступных технологий, проводимое на основе технологического бенчмаркинга, позволяет повысить уровень реализации возможностей промышленного предприятия, что, в свою очередь, обеспечивает его эффективное функционирование.

Основные направления развития концепции эффективного функционирования связаны с применением программно-целевого и системно-синергетического подходов, позволяющих выявить предпосылки к созданию необходимой модели эффективного функционирования промышленного предприятия [1]. В работе рассматривается система функционирования предприятия, которая на каждом этапе должна обеспечивать эффективность его ресурсообеспечения, производства, распределения и управления, цель которого – гармоничное взаимодействие всех элементов системы.

В ходе проекта была предложена методика оценки эффективного функционирования промышленного предприятия, осуществляемая в три этапа: подготовительный, основной (оценочный) и заключительный (рис. 1). Эта методика позволяет оценить реальный уровень эффективного функционирования предприятия: определить его слабые стороны и выявить проблемы на пути достижения максимальной эффективности. На основе полученных данных разрабатываются необходимые предложения и рекомендации.

Последовательная реализация перечисленных этапов позволяет дать оценку эффективного функционирования, согласно которой определяется реальный уровень функционирования промышленного предприятия.

Анализ теоретических и практических положений проведения бенчмаркинга позволил выявить особенности его применения для повышения эффективности деятельности предприятия [2]. В условиях инновационного развития для осуществления модернизации производства и внедрения современных технологий и техники производства в рамках обеспечения эффективного функционирования промышленных предприятий было предложено использовать технологический бенчмаркинг, поскольку он дает возможность наиболее точно установить области применения ограниченных ресурсов.

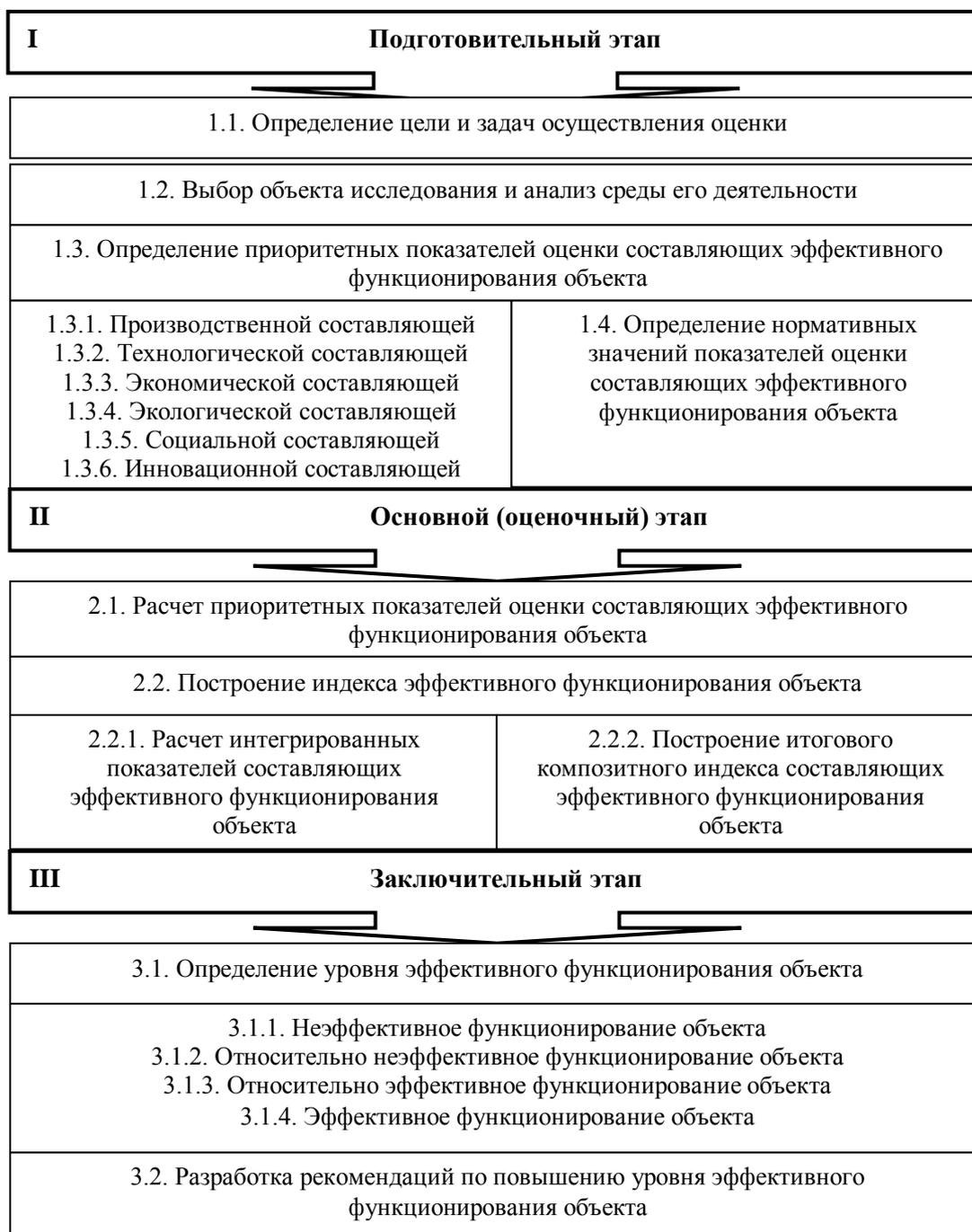


Рис. 1. Основные этапы оценки эффективного функционирования промышленного предприятия

Технологический бенчмаркинг необходим в качестве методологии идентификации и внедрения наилучших доступных технологий (НДТ), которые являются инструментом перехода промышленных предприятий на устойчивое развитие. Такие технологии позволяют

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

снизить нагрузку на окружающую среду путем сокращения выбросов и сбросов загрязняющих веществ, складирования отходов и уничтожения почвы, а также снизить ресурсопотребление производств, что обеспечивает достижение экологической устойчивости [3].

В результате технологического бенчмаркинга определяется состояние отрасли, устанавливаются основные параметры входных и выходных потоков, изучаются процессы производства и т. д., в результате чего формируются признаки и показатели НДТ.

Внедрение НДТ на промышленных предприятиях позволяет достичь следующих результатов:

- модернизации оборудования и технологических процессов;
- обеспечения высокой энерго- и ресурсоэффективности;
- рационализации потребления сырья и материалов;
- максимальной реализации потенциала предприятия;
- повышения конкурентоспособности отечественной промышленности;
- снижения экологических и производственных рисков предприятия;
- создания базы современного отечественного оборудования;
- ускорения технологического развития предприятий;
- улучшения экологической ситуации регионов и страны.

В работе предложена концептуальная модель эффективного функционирования промышленного предприятия на основе технологического бенчмаркинга с учетом принципов НДТ, которая схематично представлена на рис. 2. Данная модель включает принципы программно-целевого и синергетического подходов, а также элементы модернизации производства на основе внедрения наилучших доступных технологий посредством технологического бенчмаркинга.

Программно-целевой подход позволяет разработать комплексную программу достижения эффективного функционирования, суть которой заключается в выделении наиболее значимых целей функционирования предприятия, на основе которых формируются составляющие эффективного функционирования предприятия. Гармоничное и сбалансированное увеличение выделенных составляющих возможностей предприятия формируют систему его эффективного функционирования.

Применение системно-синергетического подхода в данной модели обусловлено необходимостью учета всех подсистем предприятия и предполагает создание системы взаимодействия основных элементов предприятия. Кроме того, системно-синергетический эффект в данной модели проявляется на основе самоорганизации, под которой понимается способность предприятия к приспособлению и развитию в условиях воздействия различных внешних и внутренних факторов.

Согласно предложенной модели, инструментом самоорганизации промышленного предприятия выступает механизм внедрения наилучших доступных технологий на основе технологического бенчмаркинга, который комплексно воздействует на составляющие возможностей предприятия, направляя его на траекторию эффективного функционирования.

Заключение

В качестве основных результатов исследования можно отметить развитие теоретико-методических основ формирования системы эффективного функционирования промышленного предприятия посредством внедрения наилучших доступных технологий и разработку модели эффективного функционирования, основанную на применении технологического бенчмаркинга отечественными промышленными предприятиями.

Результаты исследования также могут быть использованы для реализации следующих практических целей:

- определение уровня функционирования предприятия;

- принятие обоснованных решений менеджерами отечественных промышленных предприятий для формирования системы эффективного функционирования;
- проведение технологического бенчмаркинга при внедрении наилучших доступных технологий;
- формулирование государственной промышленной политики в рамках социально-экономической стратегии развития отечественной экономики.

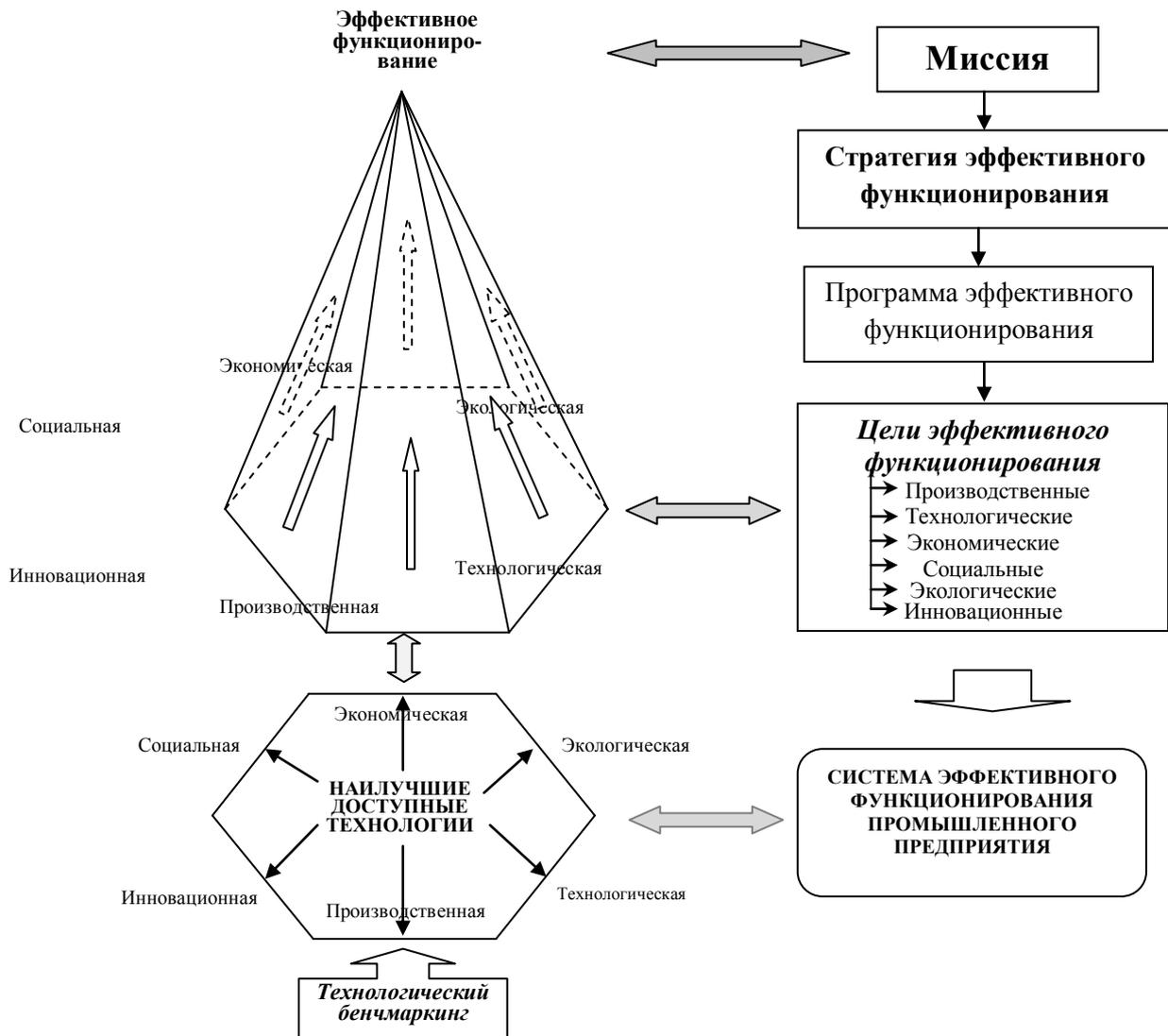


Рис. 2. Концептуальная модель эффективного функционирования предприятия

В работе предложены практические рекомендации по проведению технологического бенчмаркинга на промышленном предприятии как инструмента выбора наилучшей доступной технологии, проведена оценка результативности проводимых мероприятий на основе расчета ключевых показателей эффективного функционирования предприятия, а также сделан вывод об экономической целесообразности их внедрения.

Публикации

1. Кочегарова Т.С. Системно-синергетический подход к эффективному функционированию промышленного предприятия // Современный ученый. 2017. Т. 1. № 1. С. 38–41.

2. *Кочегарова Т.С.* Концепция эффективного функционирования предприятия // Стратегии и инструменты управления экономикой: отраслевой и региональный аспект: материалы VII Международной научно-практической конференции. Т. 1. СПб., 2017. С. 35–39.
3. *Кочегарова Т.С.* Реализация концепции модернизации предприятий региона посредством технологического бенчмаркинга // Современная наука: исследования, технологии, проекты. Сборник докладов участников научно-практической конференции молодых ученых – преподавателей, сотрудников, аспирантов, студентов, зарубежных ученых. СПб., 2017. С. 277–284.
4. *Василенок В.Л., Кочегарова Т.С.* Применение технологического бенчмаркинга для обеспечения эффективного функционирования предприятий // Успехи современной науки и образования. 2016. № 11. Т. 3. С. 178–182.
5. *Кочегарова Т.С.* Эффективное функционирование промышленных предприятий как фактор развития региона // Актуальные проблемы менеджмента: управление внутренними резервами развития регионов РФ: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2016. С. 330–332.

Литература

1. *Петров В.С.* Теоретико-методологические основы обеспечения эффективности развития промышленных предприятий: монография. М., 2015. – 96 с.
2. *Майорова Д.А.* Бенчмаркинг как инструмент стратегического менеджмента // Экономика и управление в XXI веке: тенденции развития. 2016. № 28-1. С.104–107.
3. *Сергиенко О.И. и др.* Технологический бенчмаркинг для идентификации наилучших доступных технологий: сравнительный анализ европейского и российского опыта // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2015. № 3 (22). С. 414–428.



Краснова Алена Александровна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра технологии мясных, рыбных продуктов и консервирования
холодом
E-mail: krasnova_alyona@mail.ru

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА CONVENIENCE FOOD С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЛКОВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ МЯСОПЕРЕРАБОТКИ

А.А. Краснова

Научный руководитель – доцент В.И. Филиппов

Цели проекта – разработать новые методы расчета времени термической обработки во фритюре и пароварочной машине для производства рубленых мясных продуктов полностью готовых к употреблению (входят в группу *Convenience food*), а также технологию их производства с использованием белковых ингредиентов из побочных продуктов мясопереработки.

При выполнении проекта была создана рецептура тефтелей – рубленого мясного продукта, полностью готового к употреблению. Исследования показали, что качественные характеристики тефтелей, изготовленных с применением белковых ингредиентов из побочных продуктов мясопереработки, практически не отличаются от тефтелей, изготовленных по стандартной промышленной рецептуре. Они оказались сочнее образцов, изготовленных по стандартной рецептуре, с более выраженным мясным ароматом. При этом был получен функциональный продукт, обогащенный усвояемым коллагеном, необходимым для качественной жизни [1]. Кроме того, подобная замена ингредиентов снизила себестоимость рубленых мясных полуфабрикатов на 5 %.

При разработке технологии производства подобран наилучший вариант внесения в полуфабрикат белковых ингредиентов из побочных продуктов мясопереработки. На последнем этапе фаршесоставления рекомендовано добавлять в фаршевую систему гидролизованную и денатурированную свиную шкуру в соотношении 1:1 в виде геля с повышенными прочностными характеристиками взамен 10 % основного сырья [2].

Установлено, что белковые ингредиенты из побочных продуктов мясопереработки с высокой средней молекулярной массой (700 кДа) способны увеличивать пищевую ценность продукта, а также выход высококачественного готового полуфабриката в силу своей высокой влагосвязывающей способности за счет уменьшения у жарки продукта примерно на 3 %. В промышленных масштабах производства это дает колоссальную экономию (десятки миллионов рублей в год).

При выводе формул для расчета времени термической обработки было установлено, что при обжаривании в масле и при обработке в пароварке коэффициент теплоотдачи весьма велик и поэтому для расчетов можно использовать упрощенное уравнение теории регулярного теплового режима. В результате математических преобразований было получено выражение:

$$\tau \approx \frac{\rho C R^2}{\pi^2 \lambda} \ln \left(\frac{2(T_{нач} - T_{ср})}{T_{кон} - T_{ср}} \right),$$

где ρ – плотность продукта, кг/м³; R – половина его толщины (для тефтели – радиус шара), м; λ – теплопроводность, Вт/(м·°С); C – теплоемкость, Дж/кг·°С; $T_{кон}$ и $T_{нач}$ – конечная и начальная температуры продукта в центре соответственно, °С; $T_{ср}$ – температура среды, °С. Достоинство этой формулы – возможность явно выразить время термической обработки.

Таким образом, получен удобный и универсальный метод расчета времени термической обработки пищевых продуктов во фритюре (обжаривание в масле), а также в пароварочной машине для тел разных по структуре и форме. Он упростит поиск минимально необходимого времени термической обработки мясного продукта до его готовности (а как известно, чем быстрее проходит процесс термообработки, тем меньше у жарка продукта, больше его выход и меньше затраты на электроэнергию).

Заключение

Результаты проекта могут быть использованы при проектировании новых производств или производственных линий на существующих предприятиях, выпускающих рубленые мясные продукты полностью готовые к употреблению (*Convenience food*), а также для оптимизации уже действующих процессов производства.

Публикации

1. Краснова А.А., Филиппов В.И. Композиция из гидролизованного и денатурированного коллагена в производстве рубленых мясных полуфабрикатов // Ежемесячный научный журнал «Prospero». 2016. № 1 (26). С. 71–73.
2. Краснова А.А., Куцакова В.Е. Новые методы расчета для производства *convenience food*

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

(продуктов готовых к употреблению) и применение в их производстве белковых ингредиентов из побочных продуктов мясопереработки // Межотраслевой институт «Наука и образование»: ежемесячный научный журнал. 2015. № 5 (12). С. 40–42.

3. Краснова А.А., Филиппов В.И. Применение композиции из денатурированного и гидролизованного коллагена в производстве мясных рубленых полуфабрикатов // Новые технологии. 2015. № 4. С. 20–25.

4. Краснова А.А., Филиппов В.И. Технология производства фрикаделек с применением гидролизованного коллагена // World Science: Problems and Innovations: сборник статей победителей XI Международной научно-практической конференции. Т. 1. Пенза, 2017. С. 155–157.

Литература

1. Батечко С.А., Ледзевиров А.М. Коллаген. Новая стратегия сохранения здоровья и продления молодости. Одесса, 2009. – 54 с.
2. Куцакова В.Е., Семенова А.А. Пищевые белковые ингредиенты из побочных продуктов мясопереработки // Все о мясе. 2012. № 2. С. 34–36.



Курганова Екатерина Владимировна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра прикладной биотехнологии
E-mail: katia280693@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ФЕРМЕНТИРОВАННОГО ШЕРБЕТА ДЛЯ ЗДОРОВОГО ПИТАНИЯ

Е.В. Курганова

Научный руководитель – профессор Т.П. Арсеньева

Цель исследования – разработка рецептуры и технологии замороженного ферментированного десерта по типу «шербет» с использованием фруктовых компонентов и заменителей сахара природного происхождения для здорового питания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить вид наполнителей, удовлетворяющий функциональным свойствам и потребительским предпочтениям;
- изучить физико-химические и органолептические показатели видов фруктовых наполнителей;
- подобрать способ подготовки фитокомпонентов;
- обосновать выбор подсластителя и рассчитать его рациональную дозу;
- подобрать структурообразующие компоненты и рассчитать их рациональную дозу с целью получения замороженного шербета с заданными показателями консистенции;
- произвести подбор ферментных препаратов и исследовать их влияние на готовый шербет;
- изучить физико-химические и органолептические показатели готового десерта;
- установить сроки годности замороженного шербета.

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

Разработка ферментированного шербета обеспечивает расширение ассортимента замороженных десертов и рационализацию использования сырьевых источников пищевой промышленности за счет сырья вторичного происхождения [1, 2].

При выборе ягод и фруктов для десерта основывались на их функциональных характеристиках, экономической выгоде и доступности. Остановились на клубнике, вишне и бруснике – ягодах, которые можно использовать как в натуральном, так и в замороженном виде, независимо от сезона. Из фруктов были выбраны банан и киви.

Из клубники, вишни и брусники готовили ягодный микс, из банана и киви – фруктовый. Устанавливали дозу внесения каждой составляющей. Приготовленные опытные образцы микса из ягод проверяли на сочетаемость по вкусу и аромату.

Для этого была изготовлена серия опытных образцов с миксом из ягод вишни, клубники и брусники в соотношениях 1:1:1, 1:2:2, 1:2:3 и 2:2:3 соответственно. Киви и банан в соотношениях 1:1, 2:1, 1:2, 2:3. Ягоды и фрукты в указанных выше соотношениях измельчали в пюре и добавляли в десерт. Данные органолептической оценки образцов приведены на профилограммах на рис. 1.

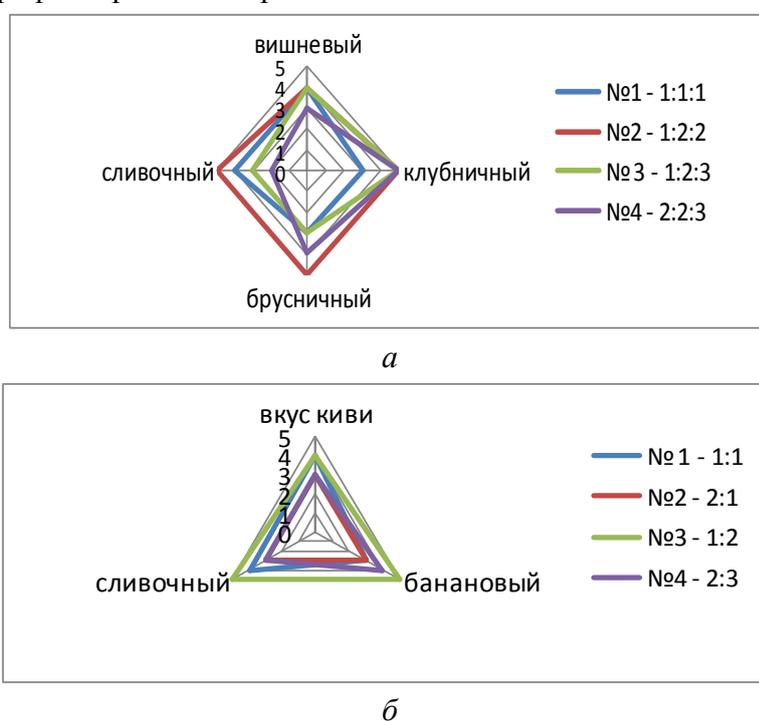


Рис. 1. Органолептическая оценка образцов с разным соотношением составных компонентов: а – наполнитель вишня, клубника и брусника; б – наполнитель киви, банан

В опытном образце №1 вкус вишни и брусники преобладал над клубничным. Остальные образцы не удовлетворили по соотношению ягодного наполнителя. В третьем и четвертом образцах вкус брусники был слишком интенсивным и навязчивым. В четвертом образце преобладал вкус вишни, маскирующий бруснику и клубнику. Во втором образце был сформирован насыщенный приятный вкус композиций ягод, соотношение вишни, клубники и брусники – 1:2:2 выбрано для дальнейшего исследования.

При подборе фруктов киви и банана по органолептической оценке оптимальным соотношением выбрано – 1:2, остальные образцы не удовлетворяли по насыщенности бананового вкуса или переизбытка киви.

В дальнейших исследованиях определяли дозу внесения подобранных композиций ягод и фруктов от массы смеси шербета. Концентрацию ягодного пюре варьировали от 20 % до 45 % от смеси с шагом 5 %. Опытные образцы подвергали фризерованию во фризере

периодического действия без принудительной подачи воздуха. В готовых образцах оценивали консистенцию. Данные представлены на рис. 2.

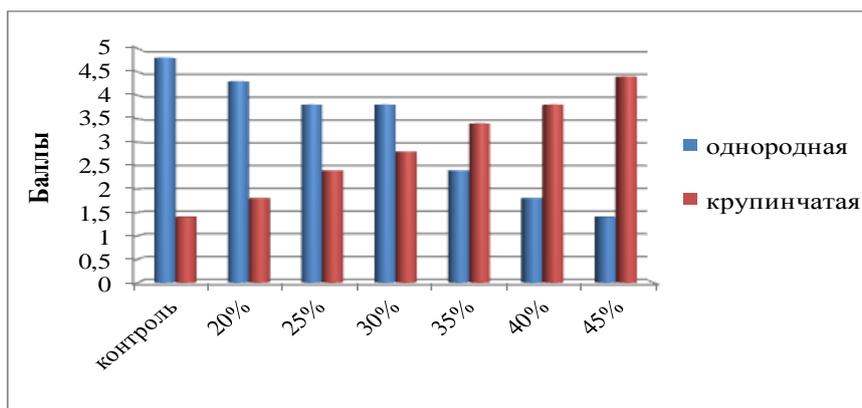


Рис. 2. Влияние концентрации фруктового пюре на консистенцию смеси готового шербета

Как видно из рис. 2, однородность консистенции готового шербета по мере увеличения концентрации ягодного пюре уменьшается, а крошливость возрастает. Однородным является образец с концентрацией пюре 25–30 %. Однако наивысшую органолептическую оценку получил шербет с концентрацией 30 %, поэтому она была рекомендована для дальнейшего исследования.

На следующем этапе осуществляли выбор сахарозаменителя. По литературным источникам были выбраны стевиозид и сироп топинамбура, так как при профилактике и лечении сахарного диабета и первого, и второго типа рекомендуется применять именно их. Стевиозид считается безвредным натуральным подсластителем низкой энергетической ценности, нетоксичным, не обладающим мутагенным и канцерогенным действием, устойчивым к нагреванию, длительному хранению, воздействию кислот и щелочей, не требующим большой дозировки, безвредным при длительном употреблении. Сироп топинамбура обладает сахароснижающей способностью, снижает давление, повышает гемоглобин, благотворно влияет на поджелудочную железу.

При внесении в шербет 0,04 % стевииды и 5 % сиропа топинамбура (рекомендуемые производителями) его вкус стал излишне кислым. Для того чтобы шербет стал более сладким, было необходимо увеличить концентрацию стевиозида. Для этого были изготовлены опытные образцы смеси, в которых его концентрация варьировалась в пределах от 0,04 % до 0,065 % с шагом 0,005 %. Данные органолептической оценки образцов представлены на рис. 3.

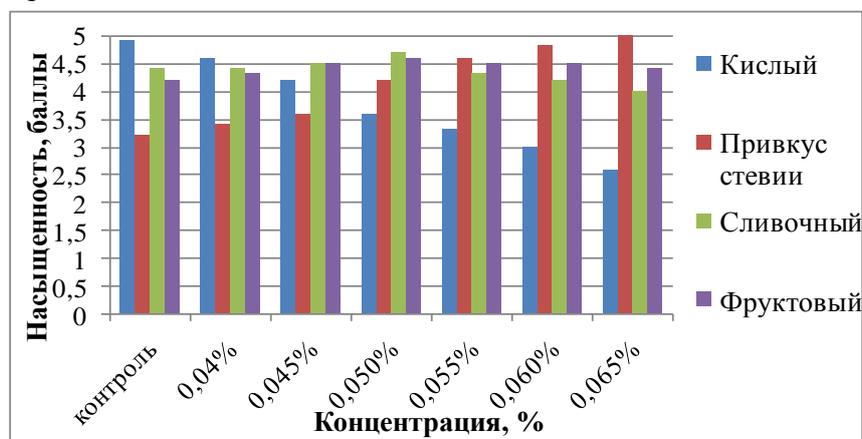


Рис. 3. Влияние концентрации стевиозида на вкус в баллах

Оказалось, что наивысшие баллы по совокупности получил опытный образец с концентрацией стевииды 0,05 %. В образцах с большим ее количеством появляется

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

выраженный вкус стевии и горькое послевкусие, при меньшем ее содержании ощущается недостаток сладости. Однако при этом в образце преобладает кисловатый вкус. Поэтому в состав добавляется сироп топинамбура определенной концентрации. В приготовленных образцах она варьировалась в пределах от 5 до 12,5 % с шагом 2,5 %, данные органолептической оценки представлены на рис. 4.

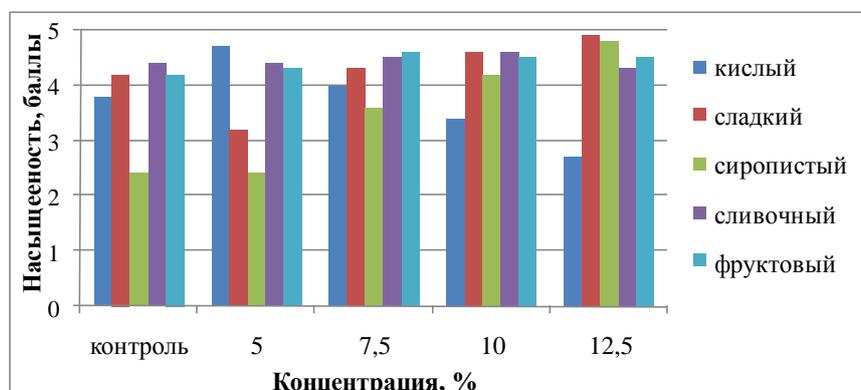


Рис. 4. Органолептическая оценка образцов с различной дозой сиропа топинамбура

Наивысшую балльную оценку получил образец с концентрацией сиропа топинамбура 7,5 %. При увеличении или уменьшении его дозы в образцах присутствуют излишне кислый или излишне сладкий вкусы.

Подобранные дозы стевियोзида (0,05 %) и сиропа топинамбура (7,5 %) удачно сочетаются в смеси, создавая хорошую композицию.

При подборе структурообразующих компонентов шербета исследовали следующие вещества: гуаровую камедь и камедь рожкового дерева, модифицированный картофельный крахмал, пищевой желатин, яблочный пектин. Необходимо определить концентрацию предложенных стабилизаторов, обеспечивающих вязкость десерта $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па·с. В процессе исследования определили, что данной вязкостью обладают растворы: 1 % желатина, 0,9 % пектина, 4 % модифицированного крахмала, 0,4 % гуаровой камеди и 0,5 % камеди рожкового дерева.

Смесь замороженного десерта готовили по рассчитанной ранее рецептуре, пастеризовали при температуре 85 °С с выдержкой 60 с и охлаждали до температуры заквашивания 40 ± 2 °С. При этом стабилизаторы вносили в молочную смесь до заквашивания. Сквашенные образцы охлаждали до температуры 0-2 °С и подвергали фризерованию. Оценивались органолептические показатели образцов и взбитость. Данные представлены в Табл. 1.

Таблица 1

Органолептические и физико-химические показатели шербета с различными стабилизаторами

Наименование стабилизатора	Органолептическая оценка	Взбитость, %
Желатин, 1 %	Неоднородная, желеобразная	13
Гуаровая камедь, 0,5 %	Мажущаяся, слизистая	30
Камедь рожкового дерева, 0,4 %	Мажущаяся, слизистая	28
Крахмал модифицированный, 4 %	Взбитая, крупинчатая	17
Пектин, 0,9 %	Пластичная, однородная, кремобразная, при взбивании пористая	25

По органолептическим показателям: вкусу, цвету и запаху опытные образцы практически не отличались друг от друга, независимо от используемого стабилизатора. Вкус

и запах были чисто молочными без посторонних привкусов и запахов. Цвет – молочно-белый. По консистенции, как видно из данных представленных в Табл. 3, наивысшая взбитость соответствовала образцам с использованием гуаровой камеди (0,5 %), камеди рожкового дерева (0,4 %) и пектина (0,9 %).

При проведении исследования по подбору ферментных препаратов для заквашивания молочной смеси использовали два вида заквасок: смеси *L. bulgaricus* с *Str. Thermophilus* и *Str. Lactococcus lactis subsp. lactis*, *Lactococcus lactis subsp. cremoris*, *Lactococcus lactis subsp. Diaceiylactis* [3]. Далее осуществляли контроль за нарастанием кислотности. В результате исследования титруемой и активной кислотностей смесей оказалось, что кислотность образцов с йогуртовой закваской нарастает быстрее и продолжительность сквашивания у них короче в два раза, чем у образцов заквашенных концентратом для сметаны. При замораживании смесь, заквашенная йогуртовой закваской, обладает нежной консистенцией, образования крупных кристаллов льда не наблюдается. Для производства замороженного шербета в дальнейшем использовали смесь *L. bulgaricus*, *Str. Thermophilus* 1:1.

Исследованные физико-химические и органолептические показатели готового десерта представлены в Табл. 2.

Таблица 2

Органолептические и физико-химические показатели готового шербета

Наименование показателя	Характеристика, значение
Вкус	Чистый выраженный кисломолочный, с соответствующим вкусом и ароматом фруктов
Цвет	Равномерный по всей массе, соответствующий цвету используемого наполнителя
Консистенция	Плотная, без комочков стабилизатора и эмульгатора
рН	4,2
Титруемая кислотность, °Т	76
М. д. сухих веществ, %	35
Взбитость, %	40
Средний диаметр воздушных пузырьков, мкм	60±1

Оценка качества готового продукта показала, что кислотность, взбитость и органолептические показатели шербета соответствуют ГОСТу на кисломолочное мороженное [4]. Продукт обладает хорошими потребительскими свойствами.

Для установления сроков годности готового продукта опытный и контрольный образцы закладывали на хранение в течение 10 месяцев при температуре минус 18 ± 2 °С [4]. В образцах контролировали: органолептические и физико-химические показатели (активная и титруемая кислотности) и бактерии группы кишечной палочки [2].

Изменения показателей качества шербета в процессе хранения приведены в Табл. 3.

Как видно из данных, представленных в этой таблице, при хранении шербета в течение семи месяцев существенных изменений в показателях его качества не наблюдается. Согласно методическим указаниям, рекомендуемый срок годности шербета – шесть месяцев при температуре хранения -18 °С.

Заключение

В результате выполнения данной работы сделаны следующие выводы:

– для внесения в шербет рекомендованы композиции: вишня, клубника и брусника в пропорции 1:2:2, киви и банан – 1:2. Внесение их в смесь в количестве 30 % позволит получить шербет с приятно выраженным вкусом ягод и фруктов;

- наивысшая бальная оценка по сладости достигнута при концентрации подсластителей: стевиозида 0,05 % и сиропа топинамбура 7,5 %;
- при композиции стабилизирующих компонентов: 1 % желатина, 0,9 % пектина, 4 % модифицированного крахмала, 0,4 % гуаровой камеди и 0,5 % камеди рожкового дерева, вносимых в смесь в концентрации 5 % от ее массы, получена максимальная взбитость и минимальный размер воздушных пузырьков, что соответствует структуре готового продукта;
- в качестве заквасочной микрофлоры подобрана чистая культура *L. bulgaricus* и *Str. Thermophilus* в пропорции 1:1, вносимая в смесь в количестве 3 %;
- изучены показатели качества готового шербета, которые отвечают требованиям ГОСТ на кисломолочное мороженое;
- установлены рекомендуемые сроки годности шербета – шесть месяцев при температуре хранения -18°C.

Таблица 3

Органолептические и физико-химические показатели готового замороженного ферментированного шербета при температуре -18 ± 2 °C

Наименование показателя	Характеристика, значение				
	Продолжительность хранения, мес				
	1	3	5	7	10
Органолептические показатели					
Вкус, запах	Чистый выраженный кисломолочный, с соответствующим вкусом и ароматом фруктов				Вкус и запах кислый не свойственный молочным продуктам
Цвет	Равномерный по всей массе, соответствующий цвету используемого наполнителя.				
Консистенция	Плотная, без комочков стабилизатора и эмульгатора				
Физико-химические показатели					
рН	4,2	4,2	4,1	4,1	3,2
Титруемая кислотность, °Т	72	72	72	80	89
Средний диаметр воздушных пузырьков, мкм	60±1	60±1	58±1	58±1	55±1
Микробиологические показатели					
БГКП в 0,1 см ³ продукта	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют	присутствуют

Публикации

1. Курганова Е.В., Арсеньева Т.П. Подбор вида и дозы стабилизатора для ферментированного замороженного шербета // Вестник Международной академии холода. 2017. № 3. С.10–15.
2. Курганова Е.В., Арсеньева Т.П. Подбор компонентов для ферментированного шербета для здорового питания // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2017. С. 252–255.
3. Курганова Е.В., Арсеньева Т.П. Влияние стабилизаторов и их комбинаций на вязкость ферментированного шербета [Электронный ресурс]// Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4620/4620.pdf> (дата обращения: 20.05.2017).

4. Курганова Е.В. Подбор наполнителей и подсластителей для сорбета здорового питания // Научные работы участников конкурса «Молодые ученые Университета ИТМО» 2017 года. СПб., 2017. С. 267–270.
5. Курганова Е.В., Рябухина Ю.В. L'histoire du developpement des aliments fonctionnels [Электронный ресурс] //Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4061/4061.pdf> (дата обращения: 06.06.2016).

Литература

1. Елхов В.Н. Состояние отечественного рынка мороженого. Тенденции, проблемы и перспективы//Мир мороженого и быстрозамороженных продуктов. 2014. № 1. С. 19.
2. Арсеньева Т.П. Справочник технолога молочного производства. Технология и рецептуры. Т. 4. СПб., 2002. – 184 с.
3. Бондаренко В.М., Грачева Н.М. Препараты пробиотики, пребиотики и синбиотики в терапии и профилактике кишечных дисбактериозов //Фарматека. 2003. №7. С. 56.
4. Оленев Ю.А., Творогова А.А. Справочник по производству мороженого. М., 2004. – 798 с.



Кучер Дмитрий Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: dmitry.a.kucher@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ОБЪЕМНОЙ ПОЛОСТИ

Д.А. Кучер

Научный руководитель – старший научный сотрудник С.А. Чивилихин

Введение

Одним из используемых методов получения неорганических наночастиц является гидротермальный синтез [1–3]. Эффективность процесса определяется пространственно-временными характеристиками поля температур в автоклаве. Исследуя параметры, определяющие этот процесс, можно найти условия, при которых он происходит наиболее эффективно. В качестве таких параметров выступают поля температур, концентраций и скоростей.

Для получения данных о процессе гидротермального синтеза необходимо построить математическую модель физических процессов, которые происходят в автоклаве во время опыта. Одним из них является конвективный теплообмен. Изменение температуры при этом происходит за счет нагрева стенок автоклава. Наличие нагревателя вызывает конвективное движение жидкости, возникающие при этом конвективные потоки приводят в движение частицы, находящиеся в растворе. Далее они перераспределяются в объеме автоклава. Места, где концентрация частиц превышает критическую для данного вещества, являются областями наиболее вероятного возникновения наночастиц. Для организации наиболее

эффективного процесса синтеза наночастиц необходимо подобрать условия, при которых объем областей с концентрацией, превышающей критическую, будет максимален.

Моделирование задачи конвективного движения

Математическое описание задачи в приближении Буссинеска выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right),$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c),$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),$$

где u, v – компоненты скорости, p – давление, η – динамическая вязкость, T – температура, ρ – плотность, α – коэффициент температуропроводности, β – коэффициент температурного расширения, T_c – равновесная температура, g – ускорение свободного падения [4].

Для верификации решателя, построенного с использованием *OpenFOAM* можно рассмотреть случай, традиционный для Европейского научного сообщества потоков, турбулентности и горения (*ERCRAFTAC – European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion*) [5].

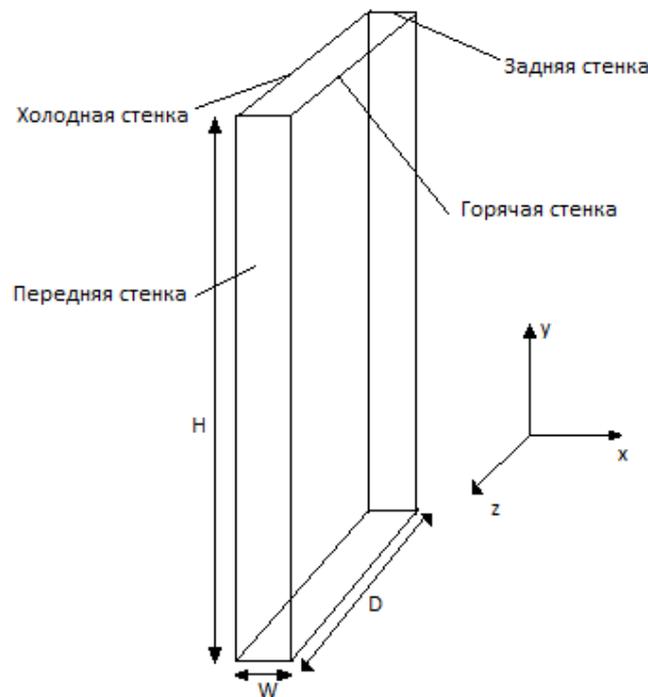


Рис. 1. Схематическое представление постановки задачи:
 H – высота сосуда, D – длина, W – ширина

Для описания этого случая граничные условия имеют следующий вид (рис. 1):

$$u(x, 0, z) = u(x, H, z) = 0,$$

$$u(0, y, z) = u(W, y, z) = 0,$$

$$u(x, y, 0) = u(x, y, D) = 0,$$

$$v(x, 0, z) = v(x, H, z) = 0,$$

$$v(0, y, z) = v(W, y, z) = 0,$$

$$v(x, y, 0) = v(x, y, D) = 0,$$

$$T(0, y, z) = T_c,$$

$$T(W, y, z) = T_h,$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}(x, 0, z) = \frac{\partial T}{\partial y}(x, H, z) = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0) = \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, D) = 0,$$

где T_h – температура горячей стенки сосуда, T_c – холодной.

Для выполнения задачи конвективного теплопереноса удобно использовать стандартный решатель из *OpenFOAM* – *buoyantPimpleFoam* [6, 7]. Это нестационарный решатель для задачи теплопереноса при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости или газа. В его основе лежит алгоритм *PIMPLE*, который является комбинацией алгоритмов *SIMPLE* и *PISO*.

Моделирование тестовой задачи проводилось с теми же параметрами, которые использовались для получения экспериментальных данных в *ERCOFTAC* [5]:

$$Pr = 0,71; T_c = 19,6^\circ\text{C}; T_h = 39,9^\circ\text{C}.$$

Результаты моделирования приведены на рис. 2, 3.

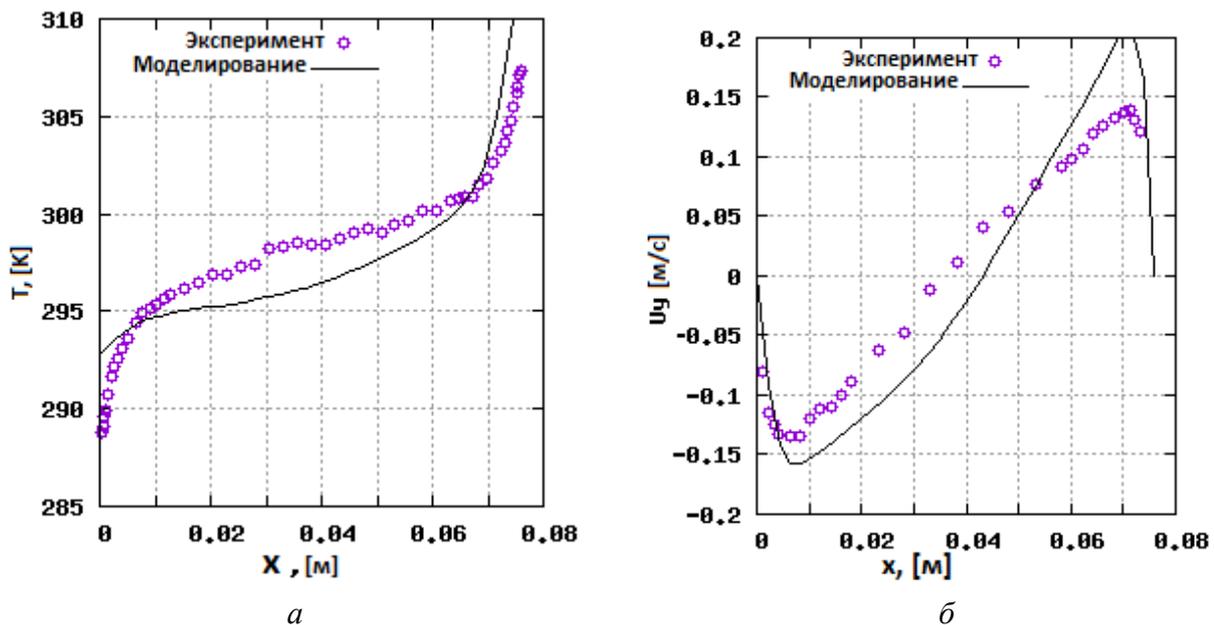


Рис. 2. Профили: а – температуры; б – вертикальной скорости на высоте 0,5 Н в ламинарном режиме

Как видно из рис. 2, для ламинарного режима отклонение результатов моделирования задачи свободной конвекции в *OpenFOAM* от экспериментальных составляет в среднем 20 %, а для турбулентного (рис. 3) – не более 30 %.

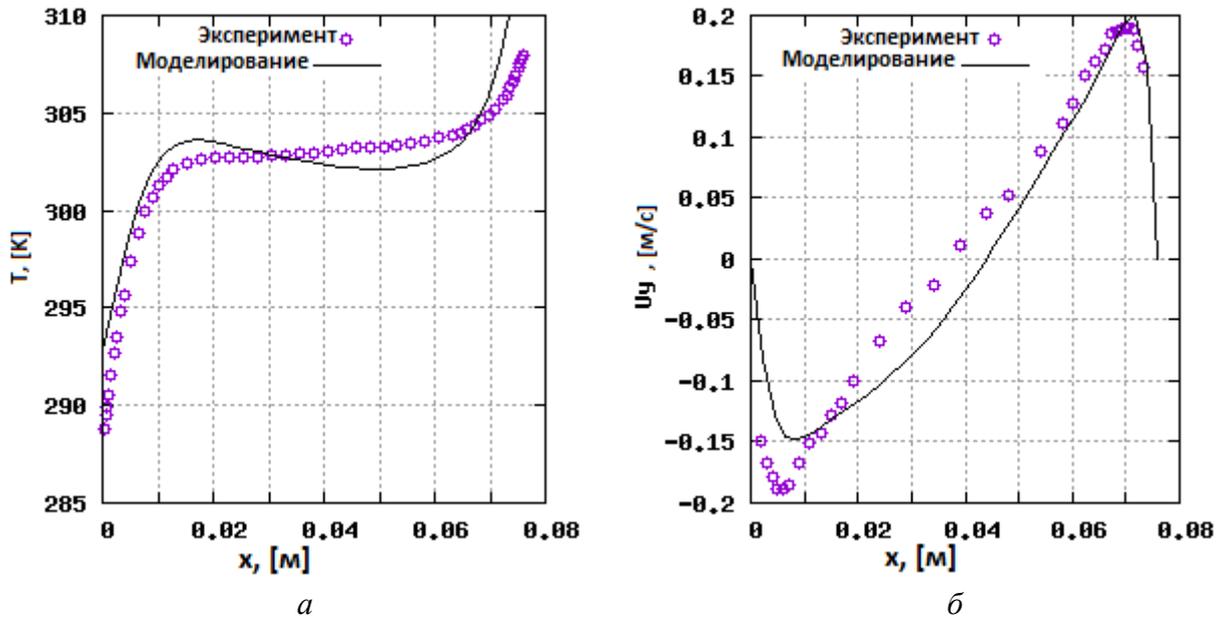


Рис. 3. Профили: а – температуры; б – вертикальной скорости на высоте 0,5 Н в турбулентном режиме

Моделирование объемного (3D) случая конвективной задачи

Для моделирования объемного (3D) случая конвективной задачи использовался встроенный решатель из *OpenFOAM* – *buoyantBoussinesqPimpleFoam*, который согласно документации [7] уместно применять для случаев конвективного теплообмена в приближении Буссинеска для нестационарных задач.

В качестве первого модельного случая использовался тестовый объект, представляющий собой модель комнаты размерами 10 x 10 x 5 м. Далее происходило моделирование нагрева с постоянными источниками тепла в 360 К, расположенными на нижней, передней и задней стенках моделируемого объекта. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

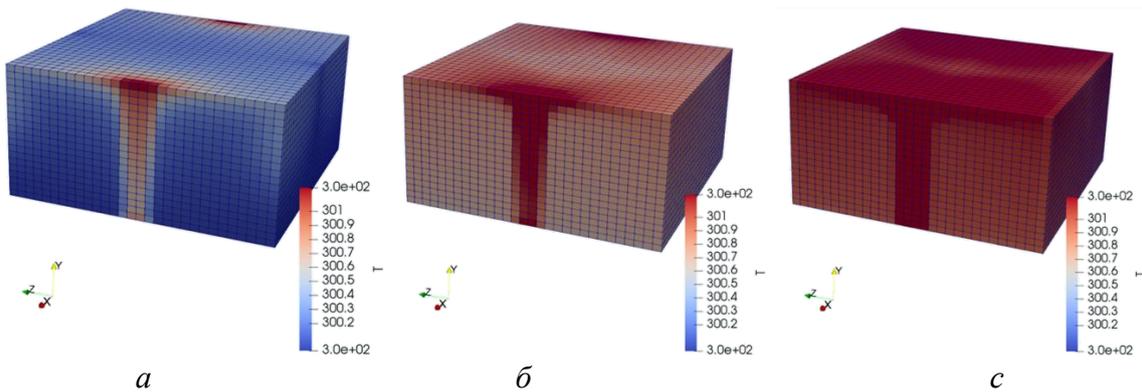


Рис. 4. Продолжительный нагрев моделируемого объекта: а – 0 с; б – 99 с; с – 160 с

Для перехода к моделированию автоклава использовался сектор цилиндра, представленный на рис. 5. *OpenFOAM* предполагает наличие специальных циклических граничных условий, которые позволяют смоделировать лишь сегмент от тела вращения при наличии симметричных граничных и начальных условий.

Результаты моделирования конвективного теплообмена для объемного цилиндра представлены на рис. 6.

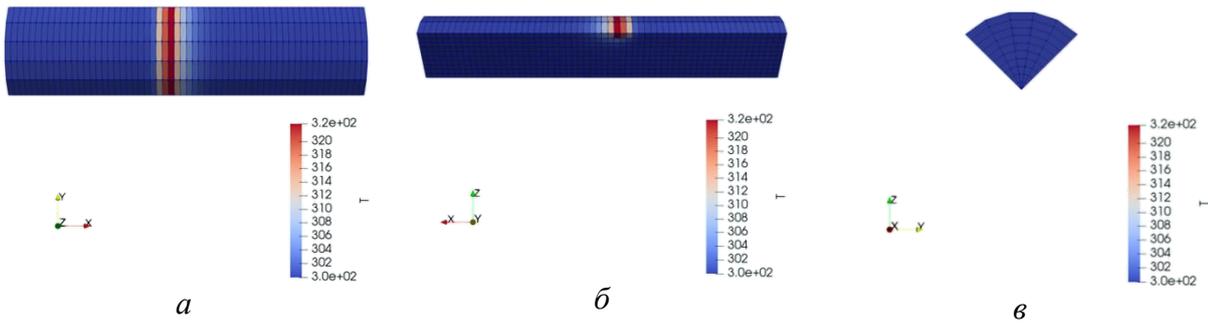


Рис. 5. Начальное состояние моделируемого автоклава:
а – вид сбоку; б – вид в разрезе; в – вид сверху

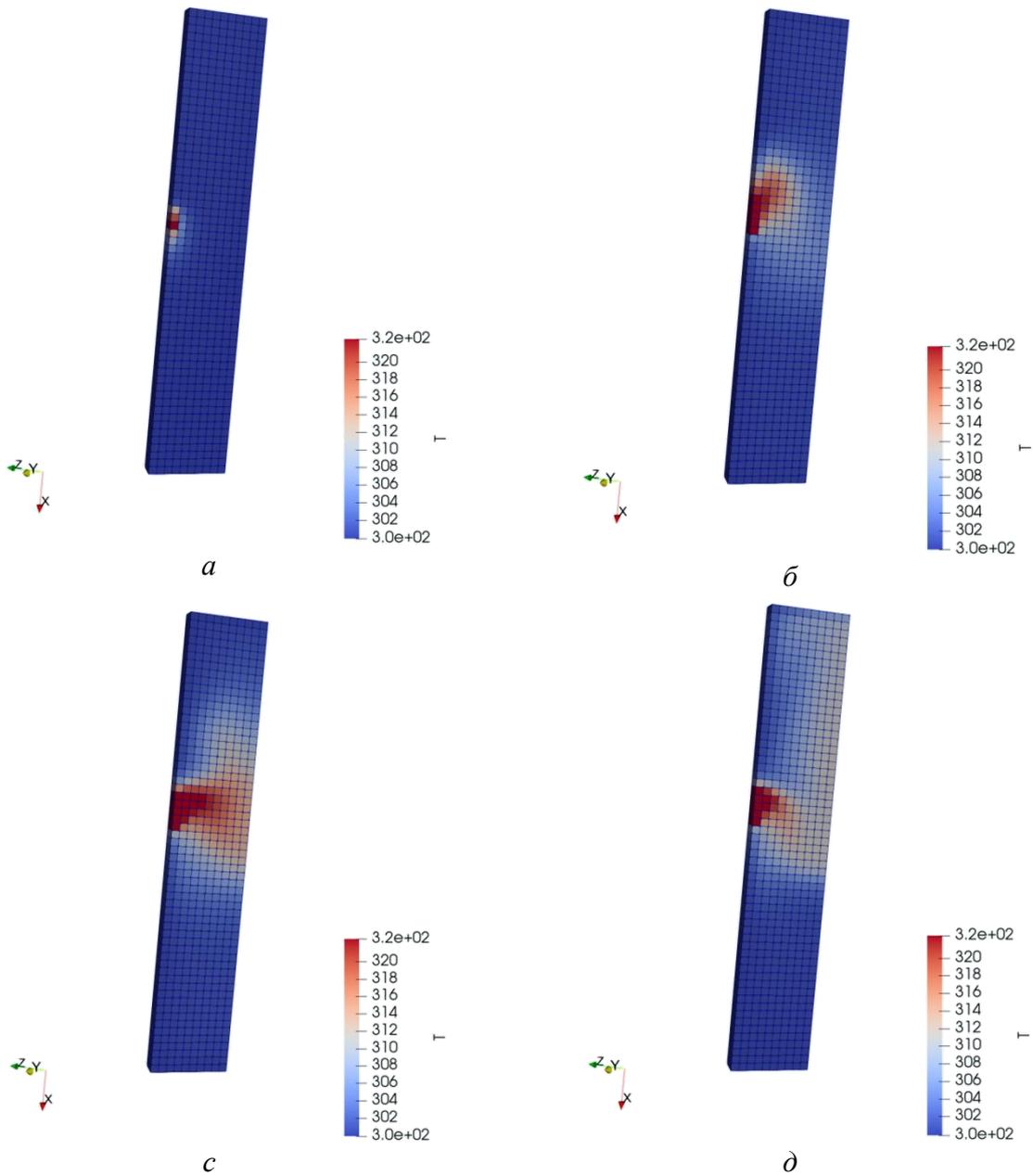


Рис. 6. Моделирование конвективного теплообмена в автоклаве:
а – при $t = 0$ с; б – при $t = 5$ с; в – при $t = 60$ с; д – при $t = 90$ с

Заключение

Построена математическая модель конвективного тепло- и массопереноса, которая на качественном уровне совпадает с характерными зависимостями, полученными экспериментально. Предложенная модель показывает устойчивость в ламинарном и турбулентном режимах конвекции. Сравнение результатов с классическими экспериментальными результатами в этой области дает отклонение не более 10 %.

Показана возможность моделирования объемного (3D) случая конвективного теплообмена в автоклаве. Построены объемные модели нескольких объектов (комната, сектор цилиндра). Проведено численное моделирование процесса нагревания раствора, помещенного в автоклав для гидротермального синтеза.

Работоспособность представленной модели позволяет производить на ее основе подбор параметров для эффективного гидротермального синтеза наночастиц в автоклаве.

Публикации

1. Манухин Б.Г., Гусев М.Е., Кучер Д.А., Чивилихин С.А., Андреева О.В. Оптическая диагностика процесса свободной конвекции жидкости // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119. № 3. С. 418–423.
2. Kucher D.A., Chivilikhin S.A., Popov I.Y., Gusarov V.V. Two-scale model of hydrothermal synthesis of nanotubes // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 541. No 1. P. 012013.
3. Kucher D.A., Manukhin B.G., Andreeva O.V., Chivilikhin S.A. Modelling natural convection of fluid in cuvette // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 536. No 1. P. 012006.

Литература

1. Zhang P., Gao L. Cadmium sulfide nanocrystals via two-step hydrothermal process in microemulsions: synthesis and characterization // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. Vol. 266. No 2. P. 457–460.
2. Hussein A.K. Applications of nanotechnology in renewable energies. A comprehensive overview and understanding // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 460–476.
3. Huang W.K. et al. Carbon nanomaterials synthesized using a spray pyrolysis method // Vacuum. 2015. Vol. 118. P. 94–99.
4. Берковский Б.М., Полевиков В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции. Минск, 1988. – 167 с.
5. ERCOFTAC “Classic Collection” database [Electronic resource]: official website. URL: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/> (дата обращения: 12.06.2016).
6. OpenFOAM user guide [Electronic resource] // CFD Direct: the Architects of OpenFOAM [Official website]. URL: <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/> (дата обращения: 09.10.2017).
7. OpenFOAM documentation [Electronic resource] // OpenFOAM Foundation [Official website]. URL: <http://www.openfoam.org/docs/> (дата обращения: 10.10.2017).



Лаврентьева Галина Михайловна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра речевых информационных систем
E-mail: lavrentyeva@speechpro.com

МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТАК ПОВТОРНОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ НА ГОЛОСОВЫЕ БИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Г.М. Лаврентьева

Научный руководитель – профессор Ю.Н. Матвеев

Цель проекта – разработка универсальных методов автоматического детектирования спуфинг-атак повторного воспроизведения на голосовые биометрические системы, наиболее эффективно решающие отдельную задачу детектирования атаки без учета влияния детектора на биометрическую систему верификации в целом.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ существующих баз спуфинг-атак, осуществлена подготовка новых баз для обучения и тестирования методов детектирования спуфинг-атак повторного воспроизведения;
- изучены имеющиеся исследования в области автоматического детектирования спуфинг-атак повторного воспроизведения, проведен анализ достоинств и недостатков рассмотренных методов и алгоритмов;
- изучены различные признаковые пространства для определения надежных и устойчивых методов детектирования спуфинг-атак повторного воспроизведения на голосовые биометрические системы;
- разработана система автоматического детектирования спуфинг-атак повторного воспроизведения на основе методов глубокого обучения;
- проведены численные эксперименты на тестовых данных с целью оценить уровни ошибок разработанных систем и сравнить их с оценками существующих;
- выполнен анализ полученных результатов.

Методы глубокого обучения

Методы глубокого обучения уже доказали свою высокую эффективность во многих задачах распознавания и классификации образов. Успешное применение конволюционных нейронных сетей (*Convolutional Neural Network, CNN*) для классификации видео [1], изображений [2, 3] и распознавания лиц [4–6] стало причиной использования подобных подходов для решения задач, связанных с анти-спуфингом.

Некоторые экспериментальные результаты подтверждают эффективность подходов, основанных на *CNN*, для детектирования спуфинг-атак синтезированной речи. Например, в [7] авторы продемонстрировали высокую эффективность глубоких нейронных сетей (*deep neural network, DNN*), *CNN* и рекуррентных нейронных сетей (*recurrent neural network, RNN*) для детектирования спуфинг-атак, основанных на синтезе и преобразовании речи, на базах конкурса *ASVspoof 2015* [8]. Они также предложили объединенную архитектуру *CNN + RNN* и доказали ее высокую эффективность. Важно отметить, что *CNN*-архитектура показала результаты, близкие к *CNN + RNN*, и результат их объединения в два раза превзошел показатели точности лучшей из индивидуальных систем. В [7] временные *CNN*-архитектуры

были предложены для детектирования преобразования и синтеза речи. Этот подход также достиг заметных результатов на корпусах конкурса *ASVspoof 2015*.

В этой статье описывается несколько систем, основанных на *CNN*-подходах, для детектирования атак повторного воспроизведения. Данная проблема может быть сведена к детектированию локальных спектральных артефактов, присутствующих в воспроизведенной речи и отличающих ее от реальной речи. Для этой цели *CNN* использовалась для извлечения признаков из входного сигнала, представленного в частотно-временной области.

Архитектуры глубокого обучения

Как показал опыт обработки изображений, выбор архитектуры конволюционных нейронных сетей является критической задачей и сильно влияет на результаты обучения. В данном исследовании были изучены несколько архитектур глубоких нейронных сетей, показавших лучшие результаты при детектировании атак повторного воспроизведения.

Inception CNN Based System

Первая предложенная архитектура нейронных сетей представляла собой *CNN* с *inception*-модулями ($ICNN_{CQT}^{SW}$) [9]. Это редуцированная версия *GoogLeNet*, которая содержит три *inception*-модуля. *Inception*-модуль выступает в качестве многочисленных конволюционных входов, которые обрабатываются на одном и том же входе параллельно. В то же время данный модуль также осуществляет пулинг. Все результирующие карты признаков затем конкатенируются перед поступлением на следующий слой. Это способствует тому, что модель выбирает лучшие свертки и получает преимущества от многоуровневого извлечения признаков путем восстановления как локальных признаков посредством меньших сверток, так и высокоуровневых признаков с большими свертками.

ICNN применялась для извлечения признаков высокого уровня из спектра, полученного на основе применения константного *Q*-преобразования (*CQT*). Последний полносвязный слой с функцией *softmax*-активации был использован для разделения классов естественной и поддельной речи во время процесса обучения. И низкоразмерная высокоуровневая аудиоформа извлекалась из предпоследнего полносвязного слоя.

Для получения унифицированной частотно-временной формы аудиосигнала использовался подход скользящего окна с размером $864 \times 200 \times 1$ и 90 % перекрытием. К *ICNN*-входу мы применили нормализацию по среднему и дисперсии.

Поскольку в этом пространстве классы высокоуровневых признаков естественной и поддельной речи хорошо разделяются, достаточно было использовать наиболее простые однокомпонентные модели для моделирования дистрибуции каждого класса, например стандартный двухклассовый классификатор на основе смеси гауссовых распределений (*Gaussian Mixture Model, GMM*): один *GMM* для естественной речи и один – для поддельной. *GMM*-классификатор был обучен на базе конкурса *ASVspoof 2017* с применением алгоритма максимизации ожидания (*Expectation Maximization, EM*). Оценка сходства рассчитывалась для входного сигнала как показатель отношения правдоподобия. В данном сценарии высокоуровневые признаки извлекались отдельно для каждого скользящего окна и все они, относящиеся к одному высказыванию, были использованы для расчета *GMM*-правдоподобия. Однако следует отметить, что подобный метод глубоких нейронных сетей для *End-to-End*-решения может быть применен без дополнительных классификаторов.

Легкая CNN

Вторая архитектура *CNN* представляла собой сокращенную версию легкой *CNN* (*Light Convolutional Neural Network, LCNN*), предложенную в [10], с меньшим количеством фильтров в каждом слое. *LCNN* состояла из пяти конволюционных слоев, четырех слоев

«сеть в сети» [11], десяти слоев *Max-Feature Map (MFM)*, четырех слоев с пулингом по максимуму и двух полносвязных слоев. Предлагаемый подход основан на использовании *LCNN*-сетей с активационной функцией *Max-Feature Map*, которая позволяет уменьшить *CNN*-архитектуру.

В отличие от обычно используемой функции *Rectified Linear Unit*, которая подавляет нейрон порогом (или смещением), *MFM* подавляет нейрон конкурентными отношениями (*competitive relationship*). В этом случае *MFM* отбирает наиболее информативные признаки. Каждый сверточный слой представляет собой комбинацию двух независимых сверточных частей, вычисленных на входе слоя. Затем используется функция активации *MFM*, чтобы вычислить поэлементный максимум этих частей. Слои пулинга с размером ядра 2×2 и шагом 2×2 используются для уменьшения размеров как по временной оси, так и по частотной.

Описанная *CNN* использовалась для получения высокоуровневых акустических признаков, в пространстве которых на этапе тестирования достаточно простого классификатор на основе *GMM*.

Было предложено несколько систем, основанных на *LCNN*-экстракторе признаков высокого уровня с различными акустическими признаками. В системе *LCNNCQT* использовались усеченные признаки, полученные из нормализованных *CQT*-спектрограмм размером $864 \times 400 \times 1$. Дополнительно были исследованы признаки, основанные на *FFT*, вместо *CQT*: *LCNNCQT* использовала усеченные признаки размером $864 \times 400 \times 1$ и *LCNNSW/FFT* была основана на применении скользящего окна для извлечения признаков с размерами окна $864 \times 200 \times 1$ и перекрытием 90 % вдоль временной оси. Альтернативная система *LCNNSW/DWT* была основана на реализации *DWT* со скользящим окном размером $256 \times 200 \times 1$ и перекрытием 83,4 %.

CNN+RNN

Также были проведены эксперименты с комбинированной *CNN+RNN*-архитектурой [12] для детектирования атак повторного воспроизведения. В данной объединенной архитектуре *CNN* использовалась для выделения признаков, а *RNN* моделировала долгосрочные зависимости речевой последовательности. Как *CNN*, так и *RNN* были оптимизированы совместно с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. В данной реализации *CNN+RNN* было использовано решение *End-to-End*.

CNN представляла собой редуцированную версию *LCNN*, но в отличие от предыдущих систем, пулинг по максимуму применялся с шагом два по оси частот для сжатия частотной информации и с шагом один вдоль временной оси для сохранения временной размерности.

RNN состоит из двух рекуррентных нейронов с управляемыми выходами (*Gated Recurrent Unit, GRU*) [13], образующих двунаправленный рекуррентный слой (*BGRU*). Первый *GRU* отвечает за прямой проход и обрабатывает данные от первого входного вектора до последнего. Второй *GRU* обрабатывает данные от последнего входного вектора до первого, делающего обратный проход. Последние выходные векторы как прямого, так и обратного прохода принимаются далее для получения двух 16-мерных векторов. Такой блок *BGRU* применяется к каждому каналу выхода *CNN*, что приводит к тензору $16 \times 2 \times 8$. Веса распределяются между блоками каждого канала для предотвращения переобучения. Сглаженный выход *RNN* используется в качестве входа на полносвязный слой с *MFM* активациями, который выдает вероятность того, что высказывание является спуфингом.

Система, основанная на данной архитектуре *CNN_{FFT} + RNN*, использовала усеченные признаки, извлеченные из амплитудного *FFT*-спектра. Вследствие ограниченных вычислительных ресурсов пришлось сократить размер входных данных для *CNN+RNN* системы. Полученные входные тензоры для системы *CNN+RNN* имели размер $256 \times 400 \times 1$.

В качестве альтернативы использовалась архитектура *CNN+RNN* для системы *CNN_{ΔEEMD} + RNN*, основанной на ансамблевой эмпирической модовой декомпозиции

EEMD-признаков, которые были получены с использованием библиотеки *libEEMD* [13] следующим образом.

1. Пусть S_0 – *FFT*-спектрограмма сигнала $x(t)$.
2. Получим первую эмпирическую моду $c_1(t)$ сигнала $x(t)$, используя *EEMD* с ансамблевым размером, равным 50, и силой шума, равной $0,1\sqrt{\text{Var}(x(t))}$.
3. Вычислим S_r как *FFT*-спектрограмму сигнала $c_1(t)$.
4. $S\Delta = |S_0 - S_r|$.

Экспериментальные данные

Для проведения экспериментов и разработки методов использовались базы данных конкурса *ASVspoof Challenge 2017* [14], который был организован для оценки возможности детектирования атак повторного воспроизведения в реальных условиях, в частности в различных акустических. Для этого на основе текстозависимой базы *RedDots* [15] была собрана база спуфинг-атак. Корпус *RedDots* был воспроизведен и повторно записан в различных акустических условиях (открытое офисное пространство, балкон и т. д.). Для записи попыток спуфинга применялись 15 различных устройств воспроизведения и 16 устройств записи, включая смартфоны, микрофоны и динамики ноутбуков, а также высококачественные динамики. Оригинальные записи *RedDots* использовались в качестве записей естественной речи.

Этот набор данных был разделен на три части: для обучения системы, развития и тестирования. В тестовой базе нет информации о спуфинге, устройствах и условиях записи. Атаки в ней записаны с помощью устройств, которые не использовались в процессе записи баз для обучения и развития – они представляли собой неизвестные атаки (детали, реализации которых неизвестны на момент обучения системы).

Оценка эффективности систем автоматического детектирования атак на голосовые биометрические системы

Для оценки качества системы автоматического детектирования атак использовались следующие общепринятые критерии качества:

- коэффициент ложного приема (*FAR*) – коэффициент ложного пропуска, вероятность ложного детектирования атаки, то есть вероятность того, что система по ошибке признает естественную речь за спуфинг-атаку;
- коэффициент ложного отказа (*FRR*) – вероятность того, что система не признает спуфинг-атаку и примет ее за естественную речь;
- равный уровень ошибок (коэффициент *EER*) – это коэффициент, при котором обе ошибки (приема и отклонения) эквивалентны. Чем меньше *EER*, тем более точной будет система.

Эксперименты

Исследования были проведены при обучении всех параметров системы анти-спуфинга на обучающем множестве, а тестирование производилось на тестовом множестве данных и базе развития. Показатели точности всех описанных индивидуальных систем на базах конкурса *ASVspoof 2017* представлены в Таблице.

Наилучший результат для базы развития и тестовой базы был получен системой *LCNN* с усеченными *FFT*-признаками. Аналогичная система с функциями *CQT* показала слабую стабильность на тестовой базе. Это объясняется низкой надежностью функций *CQT*, которая также подтверждается результатами базовой системы. Метод скользящего окна показал худшие результаты по сравнению с усеченным подходом к набору оценок. Возможная причина этого в том, что использование спектрограмм всех высказываний (в большинстве случаев) в качестве входа *CNN* приводит к более точной текстозависимой глубокой модели.

Наша комбинация $CNN+RNN$ также показала более низкое качество обнаружения атак повторного воспроизведения, чем индивидуальная $LCNN$. Это ухудшение производительности может объясняться уменьшением частотного разрешения при выделении спектра.

Таблица

Экспериментальные результаты

Индивидуальная система	EER (%)	
	База развития	Тестовая база
Базовая система	10,35	30,60
Модификация базовой системы (mvn + cmvn)	9,85	17,31
SVM_{i-vec}	9,80	12,54
$ICNN_{CQT}^{SW}$	10,74	15,11
$LCNN_{FFT}$	4,53	7,37
$LCNN_{FFT}^{SW}$	5,25	11,81
$LCNN_{CQT}$	4,80	16,54
$CNN_{FFT} + RNN$	7,51	10,69
$CNN_{\Delta EEMD} + RNN$	9,94	18,9
Объединение систем		
$LCNN_{FFT}, SVM_{i-vec}, CNN_{FFT} + RNN$	3,95	6,73
$LCNN_{FFT}, SVM_{i-vec}, CNN_{FFT} + RNN,$ $ICNN_{CQT}^{SW}, LCNN_{FFT}^{SW}, LCNN_{DWT}^{SW}, CNN_{\Delta EEMD} + RNN$	2,77	7,56

Были также подготовлены два решения, которые используют объединение отдельных систем на уровне оценок с помощью *Bosaris toolkit* [16]. Первая система использовала объединение оценок $LCNN_{FFT}$, SVM_{i-vec} и $CNN_{FFT} + RNN$. Вторая объединила системы SVM_{i-vec} , $ICNN_{CQT}^{SW}$, $LCNN_{FFT}$, $LCNN_{FFT}^{SW}$, $LCNN_{DWT}^{SW}$, $CNN_{FFT} + RNN$ и $CNN_{\Delta EEMD} + RNN$. При сравнении двух систем на базе развития и тестовой базе мы видим, что сложное слияние из семи систем имеет меньшую производительность, чем более простое слияние трех систем, совершенно разных по архитектуре, и предположительно обнаруживающих разные артефакты. Несмотря на заметное снижение качества для некоторых отдельных систем на тестовой базе, разница в 1 % EER для объединения систем объясняется впечатляющим результатом $LCNN_{FFT}$. Согласно модели слияния *Bosaris*, эта система имеет наибольший вес в обоих объединенных решениях. Однако предполагается, что сложная система лучше детектирует спуфинг-атаки повторного воспроизведения с более разнообразными условиями.

При сравнении двух систем на базе развития и тестовой базе мы видим, что сложное слияние из семи систем имеет меньшую производительность, чем более простое слияние трех систем, совершенно разных по архитектуре, и предположительно обнаруживающих разные артефакты.

Заключение

В этом исследовании была рассмотрена применимость подхода глубокого обучения для решения проблемы обнаружения спуфинг-атак повторного воспроизведения. Были исследованы современные методы для обнаружения атак, реализованных с помощью технологий синтеза и преобразования речи, а также методы глубокого обучения. Эксперименты, проведенные на корпусах конкурса *ASVspoof 2017*, подтвердили высокую эффективность использования методов глубокого обучения для обнаружения спуфинга в реальных условиях. Уровень EER лучшей отдельной системы CNN составил 7,34 %, а лучшая система, основанная на объединении нескольких индивидуальных систем, обеспечила 6,73 % EER на тестовой базе.

Публикации

1. *Lavrentyeva G. M., Novoselov S.A., Simonchik K.K.* Anti-spoofing methods for automatic speaker verification system // *Analysis of Images, Social Networks and Texts. AIST 2016. Communications in Computer and Information Science.* 2016. Vol. 661. P. 172–184.
2. *Лаврентьева Г.М.* Методы противодействия спуфинг атак на голосовые биометрические системы // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО.* Т. 3. СПб., 2016. С. 93–95.
3. *Лаврентьева Г.М.* Современные методы детектирования спуфинг атак на голосовые биометрические системы [Electronic resource] // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых.* СПб., 2015.
URL: http://kmu.ifmo.ru/collections_article/2849/sovremennye_metody_detektirovaniya_spufig_a_tak_na_golosovye_biometricheskie_sistemy.htm (accessed: 08.02.2018).
4. *Shchemelinin V.L., Kozlov A.V., Lavrentyeva G.M., Novoselov S.A., Simonchik K.K.* Vulnerability of voice verification system with STC anti-spoofing detector to different methods of spoofing attacks // *Speech and Computer. SPECOM 2015. Lecture Notes in Computer Science.* 2015. Vol. 9319. P. 480–486.
5. *Novoselov S.A., Kozlov A.V., Lavrentyeva G.M., Simonchik K.K., Shchemelinin V.L.* STC anti-spoofing systems for the ASVspoof 2015 challenge // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing.* Shanghai, 2016. P. 5475–5479.
6. *Lavrentyeva G.M., Kozlov A.V., Novoselov S.A., Simonchik K.K., Shchemelinin V.L.* Automatically trained TTS for effective attacks to anti-spoofing system // *Speech and Computer. SPECOM 2015. Lecture Notes in Computer Science.* 2015. Vol. 9319. P. 137–143.
7. *Lavrentyeva G.M., Novoselov S.A., Malykh E.A., Kozlov A.V., Kudashev O.Y., Shchemelinin V.L.* Audio replay attack detection with deep learning frameworks // *Interspeech 2017: 18th Annual Conference of the International Speech Communication Association.* Stockholm, 2017. P. 82–86.
8. *Lavrentyeva G.M., Novoselov S.A., Malykh E.A., Kozlov A.V., Kudashev O.Y., Shchemelinin V.L.* Audio-replay attack detection countermeasures // *Speech and Computer. SPECOM 2017. Lecture Notes in Computer Science.* 2017. Vol. 10458. P. 171–181.

Литература

1. *Karpathy A. et al.* Largescale video classification with convolutional neural networks // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* Columbus, 2014. P. 1725–1732.
2. *Bengio Y. et al.* Representation learning: a review and new perspectives // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2013. Vol. 35. No 8. P. 1798–1828.
3. *Krizhevsky A. et al.* ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Advances in Neural Information Processing Systems.* Lake Tahoe, Nevada, 2012. P. 1097–1105.
4. *Taigman Y. et al.* DeepFace: closing the gap to human level performance in face verification // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* Columbus, 2014. P. 1701–1708.
5. *Galbally J. et al.* Biometric antispoofing methods: a survey in face recognition // *IEEE Access.* 2014. Vol. 2. P. 1530–1552.
6. *Yang J. et al.* Learn convolutional neural network for face anti-spoofing [Electronic resource] // *arXiv.org [Official website].* URL: <https://arxiv.org/abs/1408.5601> (accessed: 08.02.2018).
7. *Tian X. et al.* Spoofing speech detection using temporal convolutional neural network // *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA).* Jeju, 2016. P. 699–704.
8. *Wu Z. et al.* ASVspoof 2015: the first automatic speaker verification spoofing and countermeasures challenge // *Training.* 2015. Vol. 10. No 15. P. 3750.

9. Szegedy C. et al. Going deeper with convolutions [Electronic resource] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston, 2015. arXiv.org [Official website]. URL: <http://arxiv.org/abs/1409.4842> (accessed: 08.02.2018).
10. Wu X. et al. A light CNN for deep face representation with noisy labels [Electronic resource] // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2015. arXiv.org [Official website]. URL: <https://arxiv.org/abs/1511.02683> (accessed: 08.02.2018).
11. Lin M. et al. Network in network [Electronic resource] // arXiv.org [Official website]. URL: <http://arxiv.org/abs/1312.4400> (accessed: 08.02.2018).
12. Zhang C. et al. An investigation of deep learning frameworks for speaker verification anti-spoofing // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2017. Vol. 11. No 4. P. 684–694.
13. Chung J. et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling [Electronic resource] // arXiv.org [Official website]. URL: <http://arxiv.org/abs/1412.3555> (accessed: 08.02.2018).
14. Kinnunen T. et al. The ASVspoof 2017 challenge: assessing the limits of replay spoofing attack detection [Electronic resource] // Interspeech 2017: 18th Annual Conference of the International Speech Communication Association. Stockholm, 2017. URL: http://www.isca-speech.org/archive/Interspeech_2017/pdfs/1111.PDF (accessed: 08.02.2018).
15. Lee K.A. et al. The reddots data collection for speaker recognition [Electronic resource] // Interspeech 2015: 16th Annual Conference of the International Speech Communication Association. Dresden, 2015. URL: http://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2015/i15_2996.html (accessed: 08.02.2018).
16. Brummer N., de Villiers E. Bosaris toolkit: official website. URL: <https://sites.google.com/site/bosaristoolkit> (accessed: 08.02.2018).



Лавров Владимир Сергеевич
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: vladimir8812@mail.ru

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ В БУКСИРУЕМОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ КОСЕ

В.С. Лавров

Научный руководитель – доцент А.В. Куликов

Цель проекта – разработка и создание системы регистрации растягивающей нагрузки в буксируемой сейсмической кose (БСК).

Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:

- рассчитана оптическая схема и подобраны параметры системы;
- построена компьютерная модель волоконно-оптического тензометрического датчика (ВОТД) для БСК;
- изготовлен макет системы регистрации растягивающей нагрузки и встроен в кабельный сегмент БСК;
- проведены исследовательские испытания макета системы регистрации растягивающей нагрузки.

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

Работа ВОТД сводится к регистрации растяжения оптического волокна (ОВ) в процессе буксировки БСК, а показателем растяжения выступает сдвиг длины волны отражения волоконной брэгговской решетки (ВБР) [1]. Моделирование тензодатчика было разбито на следующие этапы: построение модели кабеля БСК в программе для моделирования физических процессов «*Comsol Multiphysics*» *Solid Mechanics* и получение данных о растяжении ОВ, которое затем пересчитывается в сдвиг длины волны ВБР [2]. Геометрия модели показана на рис. 1а.

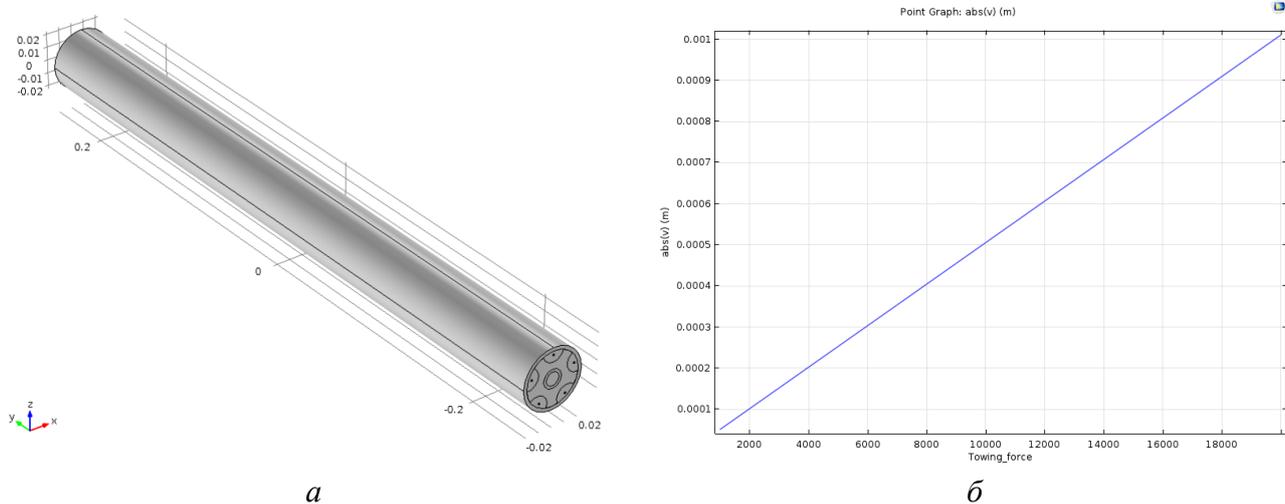


Рис. 1. а – задание геометрии макета тензометрического датчика в БСК;
б – удлинение оптического волокна тензометрического датчика в БСК

При известной длине компьютерной модели удлинение волокна выражается в процентах. Результат представлен на рис. 1б. В Табл. 1 приведены значения нагрузки в Ньютонах и соответствующее ей удлинение ОВ в процентах, а также изменение длины волны ВБР в нанометрах. Изменение показателя преломления было учтено теоретическими исследованиями, взятыми из литературы [3].

Таблица 1

Изменение длины волны ВБР в зависимости от величины растягивающей нагрузки

Растягивающая нагрузка, Н	Изменение длины волны, нм	Растягивающая нагрузка, Н	Изменение длины волны, нм
2000	0,31	12000	1,86
4000	0,62	14000	2,17
6000	0,93	16000	2,48
8000	1,24	18000	2,79
10000	1,55	20000	3,1

Как видно из таблицы, при максимальной нагрузке в 20000 Н уход длины волны ВБР составляет 3,1 нм, что полностью покрывается спектром излучения используемого источника излучения VCSEL.

Выбранная оптическая схема ВОТД представлена на рис. 2. Она состоит из двух частей: бортового измерительного блока и забортного кабеля. Опрашивающий интеррогатор располагается в бортовом блоке, он содержит линейку лазерных диодов (ЛД) с длинами волн $\lambda_1 - \lambda_n$, соответствующими спектрам отражения ВБР в забортном кабеле. Излучение от ЛД объединяется в одном оптическом волокне с помощью мультиплексора (MUX). ВБР с длинами волн $\lambda_1 - \lambda_n$ объединены на одном оптическом волокне с помощью add/drop мультиплексоров (A/D), которые разделяют оптическое излучение по длинам волн. Длины

волн λ_i ВБР и А/Д должны быть разнесены согласно *CWDM*-диапазону для предотвращения взаимного влияния каналов друг на друга. ВБР, встроенные в забортный кабель БСК, подвергаются растягивающей нагрузке, из-за которой у ВБР смещается длина волны отражения λ_i . Волоконно-оптический циркулятор направляет отраженные импульсы к линейке фотоприемных устройств, разделение по длинам волн осуществляет демультиплексор (*DEMUX*). В интеррогаторе для опроса ВБР используется ЛД *VCSEL*. Модулирующий токовый импульс, попадая на ЛД, изменяет центральную длину волны излучения ЛД. Зная в каждый момент времени длину волны излучения и показания ФПУ, можно восстановить форму спектра отражения ВБР и ее центральную длину волны, а следовательно, и силу растягивающей нагрузки.

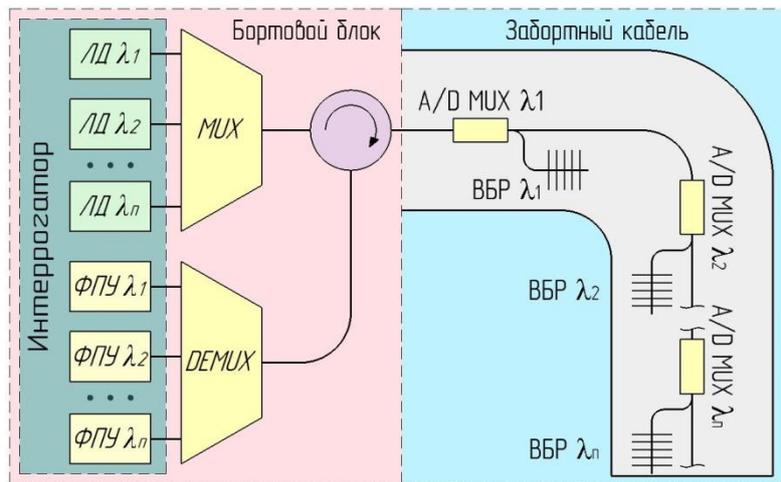


Рис. 2. Оптическая схема ВОТД

В рамках выполнения данной работы был изготовлен макет ВОТД на ВБР, встроенных в БСК. Для этого использовали кабельную заготовку БСК, в которую была внедрена ВБР и залита специально подобранным полиуретановым материалом «Силкаст СПБ-ХП-80» (твёрдость по Шору 60 А). Поверх конструкции была нанесена защитная оболочка (рис. 3).



Рис. 3. а – кабельная основа и ВБР в защитной гильзе;

б – макет забортного кабеля системы регистрации растягивающей нагрузки

В качестве макета системы регистрации растягивающего воздействия было собрано устройство с широкополосным источником излучения, суперлюминесцентным диодом фирмы *ThorLabs* серии *S5FC1005SXL* и анализатором оптического спектра *AQ6370D*. Такая компоновка приборов позволяет просканировать необходимый диапазон частот.

Исследовательские испытания проводились следующим образом: кабельная часть была зафиксирована на неподвижной опоре, а ко второму ее концу прикладывалась нагрузка. Изменение длины волны отражения ВБР регистрировалось с помощью широкополосного источника и анализатора спектра (рис. 4).

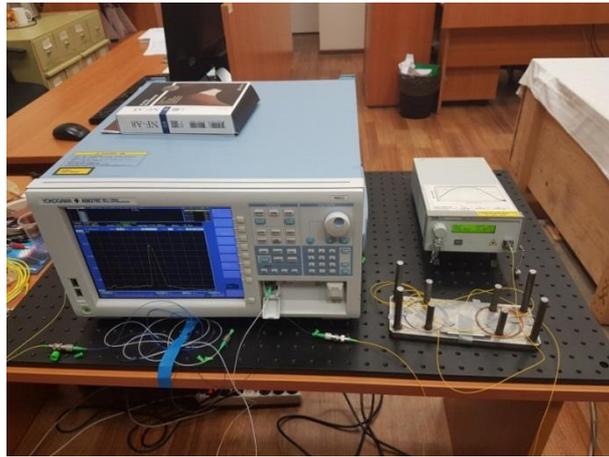


Рис. 4. Система регистрации изменения длины волны ВБР в макете ВОТД в БСК

На рис. 5 приведены данные со спектроанализатора, полученные в ходе эксперимента.

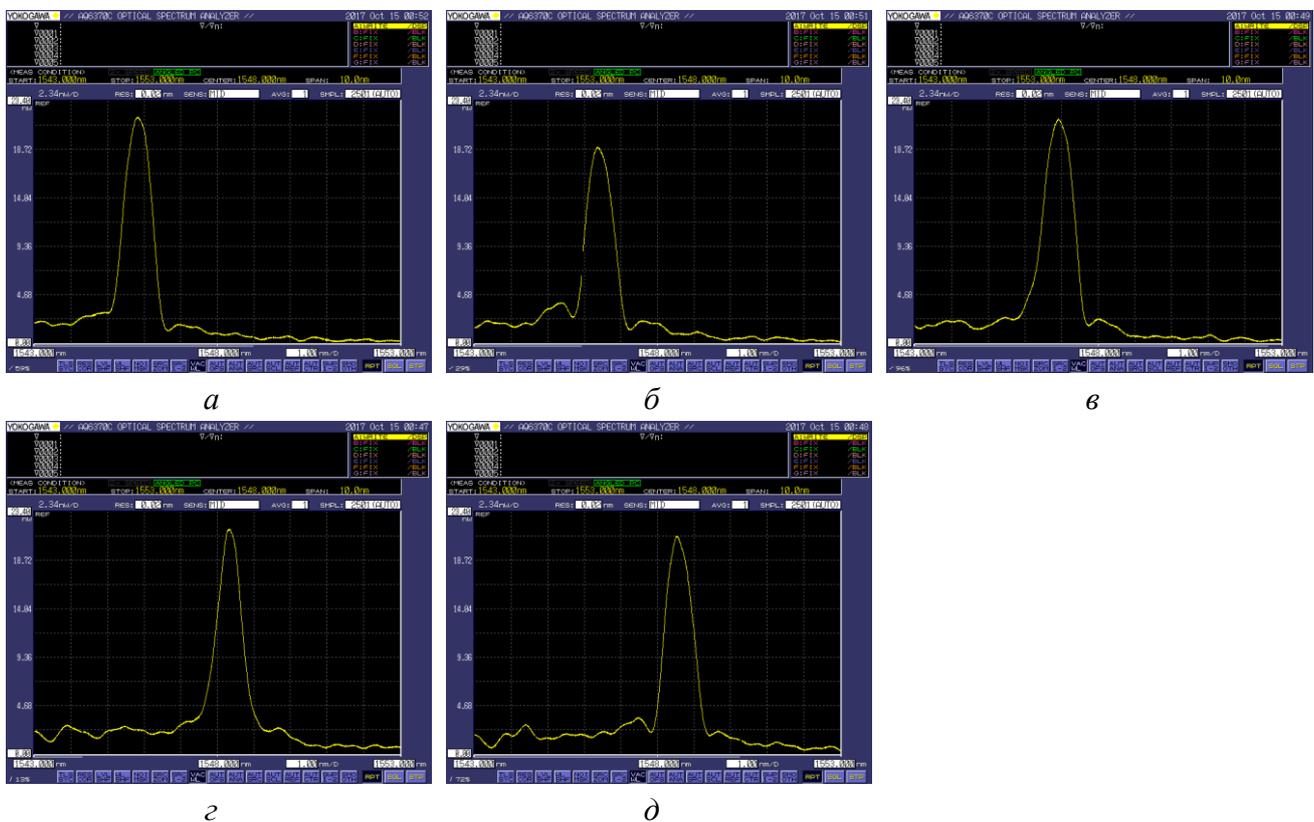


Рис. 5. Экспериментальные данные со спектроанализатора при приложении нагрузки:
а – 0 Н; б – 500 Н; в – 1000 Н; г – 1500 Н; д – 2000 Н

Как видно из рис. 5, при увеличении нагрузки спектр отражения ВБР линейно изменяется. При этом каждые 727 Н изменяют длину волны отражения на 1 нм. С учетом того, что теоретическое спектральное разрешение интеррогатора в бортовом блоке 0,01 нм, разрешение прибора составляет около 7 Н. Для увеличения диапазона измеряемой растягивающей нагрузки необходимо использовать более твердый материал, например «Силкаст СПБ-ХП-80» с твердостью по Шору 80 А, что уменьшит разрешение прибора, но увеличит максимально регистрируемое значение растягивающей нагрузки до 30 000 Н. Из-за того, что требуемая максимальная нагрузка должна быть увеличена в 15 раз, разрешение прибора пропорционально этому ухудшится до 105 Н.

В результате выполнения проекта поставленная цель была достигнута: спроектирован и собран работоспособный макет ВОТД для БСК с разрешающей способностью в 105 Н и максимальной нагрузкой в 30 000 Н. Диаметр ВОТД составил 3 мм. Количество мультиплексированных датчиков, расположенных на одном волокне, – не более 18 единиц.

Публикации

1. Коннов К.А., Забиякин А.Н., Варжель С.В., Грибаев А.И., Лавров В.С. Исследование влияния механических напряжений на характеристики волоконных брэгговских решеток Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica – 2014». СПб., 2014. С.74–76.
2. Lavrov V.S., Plotnikov M.Y., Aksarin S.M., Efimov M.E., Shulepov V.A., Kulikov A.V., Kireenkov A.U. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings // Optical Fiber Technology. 2017. Vol. 34. P. 47–51.
3. Патент на изобретение 2602422 Российская Федерация. Акустооптический волоконный кабель и способ его изготовления / И.К. Мешковский, А.В. Куликов, И.А. Соколов, Д.М. Инденбаум, В.С. Лавров. Опубл. 20.11.2016.
4. Lavrov V.S., Kulikov A.V., Plotnikov M.Y., Efimov M.E., Varzhel' S.V. Study of influence of the fiber optic coatings parameters on optical acoustic sensitivity // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012014.

Литература

1. Варжель С.В. Брэгговские дифракционные структуры для волоконно-оптических измерительных систем: дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. – 142 с.
2. Коннов К.А. и др. Исследование влияния механических напряжений на характеристики волоконных брэгговских решеток Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica – 2014». СПб., 2014. С.74–76.
3. Нгуен С.М. Изменение коэффициента преломления оптоволокна при продольном растяжении // Science Time. 2005. № 4 (16). С. 528–536.



Ланцева Анастасия Андреевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра высокопроизводительных вычислений
E-mail: a.a.lantseva@gmail.com

РАЗРАБОТКА СЕМЕЙСТВА МЕТОДОВ АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ РИСКОВ, СВЯЗАННЫХ С ПРОВЕДЕНИЕМ МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

А.А. Ланцева

Научный руководитель – доктор технических наук А.В. Бухановский

Цель исследования – разработка методов априорной оценки рисков, связанных с проведением массовых мероприятий. Методология исследования работ основывается на математическом моделировании и прогнозировании мобильности участников массового мероприятия.

Идея проекта заключается в том, чтобы на основе мультиагентной модели, максимально приближенной к реальному поведению и динамике большого скопления людей, разработать методы априорной оценки возможных рисков распространения заболевания или информации на микроуровне – контактная сеть (во время мероприятия), макроуровне распространение за пределами данной контактной сети (после проведения мероприятия). Назначением проекта является формирование системы оценивания рисков в рамках крупномасштабных массовых мероприятий, связанных с распространением инфекции или информации внутри динамической контактной сети.

Одна из потенциальных опасностей массовых мероприятий – угроза распространения быстропротекающих инфекций во время их проведения и за пределами области их проведения вследствие перемещения инфицированных индивидов.

Метод моделирования распространения инфекции основан на распространении сигнала (инфекции) между узлами динамической контактной сети. Данная сеть строится на основе мультиагентной модели [1–3], где связь между агентами образуется при попадании одного агента в радиус действия другого. Непосредственно радиус действия зависит от параметров моделирования и воссоздания конкретных характеристик контактной сети (более плотной или разряженной). Изначально все агенты делятся случайным образом на зараженных и здоровых. Далее при возникновении связи между здоровым и больным агентом производится попытка заражения с интенсивностью, соответствующей конкретному инфекционному заболеванию. Зараженный агент в масштабах модели не осуществляет дальнейшее заражение, так как находится в инкубационном периоде, который значительно превышает период моделирования (десятки минут) и своего поведения не меняет. Риск заболевания оценивается как доля заразившихся агентов в общей численности посетителей массовых мероприятий.

Разработка семейства методов априорной оценки рисков, связанных с проведением массовых мероприятий

Метод оценки рисков заключается в добавлении к мультиагентной модели следующих модулей моделирования: распространения сигнала, связанного с риском (инфекции, информации и т. д.) и изменений состояний агентов под воздействием сигнала.

Для моделирования распространения инфекции и информации был разработан механизм построения контактной сети в виде графа без петель, генерирующегося на каждой итерации. Вершины графа представляют собой агентов, а ребра – контакты между ними в течение данной итерации. Контакт двух агентов возникает только при условии их нахождения на расстоянии, не превышающем некоторого (заданного заранее) радиуса. Контакт длится до тех пор, пока расстояние между агентами не превысит величину радиуса его возникновения.

Для моделирования развития инфекции или восприятия информации как частного случая задается конечное множество состояний агентов на основе марковских цепей. Состояние агента характеризует его текущий статус по отношению к распространяемой информации. При контакте между агентами возможна смена состояния каждого из них. Модель смены состояний при контакте строится с помощью содержащей их простой цепи Маркова с дискретным временем. Вероятности смены состояний агентов при контакте задаются с помощью значений матрицы переходных вероятностей цепи. Сгенерированному агенту присваивается состояние S . После контакта с носителем информации агент переходит в состояние E и принимает решение о достоверности полученной информации: «верит» (переходит в состояние $I1$) либо «не верит» (и переходит в состояние $I2$). Состояние $I2$ характеризует агентов, распространяющих информацию. Переход в это состояние определяется сценарием имитации распространения информации.

Метод и алгоритм моделирования динамики толпы и оценки рисков при возникновении внутреннего источника возмущения (распространение информации, слухи)

Были запущены четыре сценария, различающиеся вероятностью усвоения слуха агентом: 5, 10, 20 и 50 %. Распространение слуха начиналось на десятой минуте модельного времени (за это время агенты, вошедшие в храм в начале моделирования, успевают дойти до конца храма). Скорость распространения была установлена 1 м/с.

В ходе проведения экспериментов с различными сценариями были рассчитаны оценки рисков распространения слухов. На основе полученных результатов были построены карты помещений, графики результатов экспериментов и графики оценки рисков распространения. Для каждого запуска эксперимента были подобраны соответствующие параметры, такие как параметры эксперимента, коэффициенты для расчета рисков, последовательность сценариев, которые будут построены в графическом виде, временной интервал для осуществления визуализации результатов и набор пар стратегий для попарной визуализации. В рамках эксперимента по распространению слухов в закрытом помещении был разработан ряд сценариев, согласно которым каждый посетитель воспринимает слух как правду с заданной вероятностью. На рис. 1 представлена плотность людей в помещении для двух различных сценариев. Для каждого типа помещения подбирается максимальная плотность людей, обозначенная как предельная. На ее основе для каждого сценария рассчитывается относительная плотность людей. Данные значения используются для оценки рисков распространения слуха.

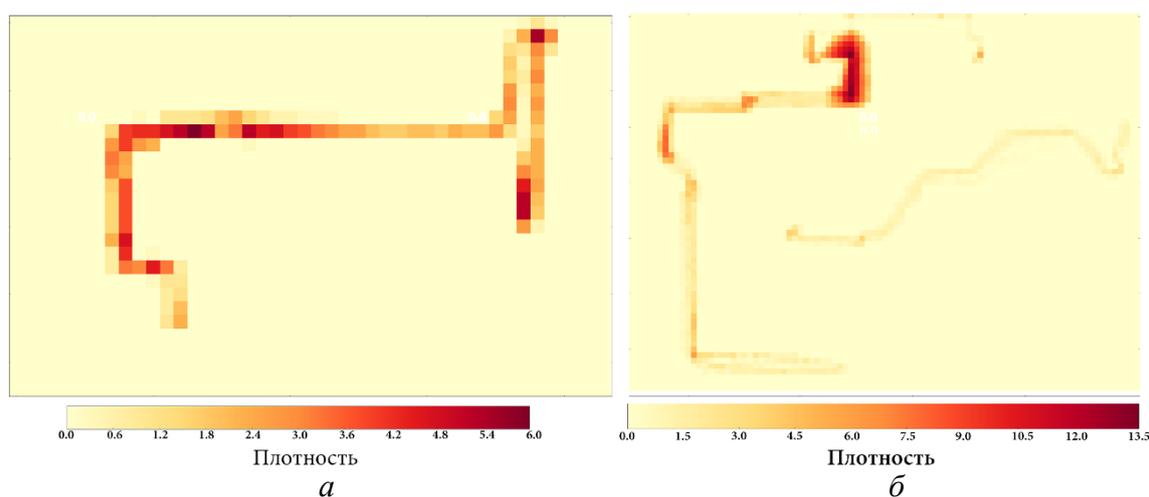


Рис. 1. Плотность людей для двух различных сценариев:
а – 5 % людей усвоили слух; б – 50 % людей усвоили слух

На рис. 2 показана пропускная способность помещений (количество людей, вошедших в него и покинувших за определенный промежуток времени) для двух сценариев.

Метод и алгоритм моделирования и оценки рисков распространения инфекционных заболеваний

Одной из потенциальных опасностей, сопутствующих крупномасштабным массовым мероприятиям (ММ), является угроза распространения быстропротекающих инфекций в ходе их проведения, а также дальнейшее распространение болезни вследствие перемещения инфицированных индивидов по транспортным потокам.

Моделирование распространения инфекционных заболеваний производится на динамических контактных сетях с варьируемыми значениями параметров контактов, которые представляют собой контактные сети взаимодействия людей внутри храмов, как небольших (число посетителей до 1000 человек), так и более вместительных (до 40 000 человек). Для каждой исходной сети предложено четыре вариации, в которых

предельное расстояние эффективного контакта между индивидами (то есть контакта с последующей передачей инфекции) равно 0,5; 1; 1,5 и 2 м. Между двумя фиксированными узлами сети связь формируется тогда и только тогда, когда индивиды, представленные данными узлами, находятся друг от друга на расстоянии эффективного контакта. Очевидно, что чем меньше заданное предельное расстояние, тем менее связной является сеть. Следовательно, сеть с предельным расстоянием контакта в 2 м является наиболее полной и связной из представленных.

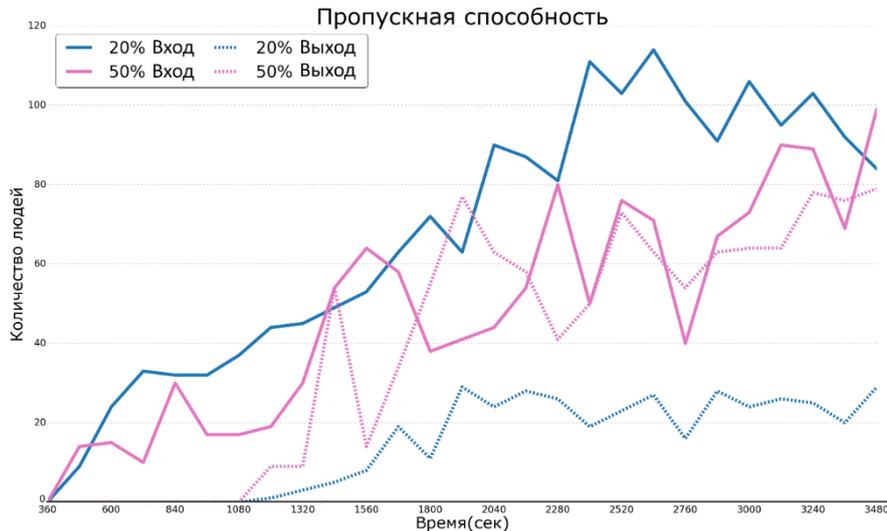


Рис. 2. Пропускная способность помещений для двух различных сценариев

Для реализации распространения инфекционных заболеваний были разработаны три подхода к распространению инфекции. Все методы основаны на стандартной эпидемиологической модели *SI* с вероятностью заражения $p = 0,3$, где существуют только два типа индивидуумов: здоровый и инфицированный. Для всех экспериментов было зафиксировано начальное число инфицированных узлов, которое составляет 3 % от общего их числа.

На рис. 3, 4 представлены результаты работы данной модели для малых и крупных контактных сетей, где по оси абсцисс указывается время моделирования, а по оси ординат – среднее число заболевших за конкретный период времени (в нашем случае – 2 мин.) без учета результатов на предыдущем временном отрезке. Из графиков видно, что для сетей с предельным расстоянием эффективного контакта в 1 м и меньше процент зараженных узлов значительно ниже. Это объясняется тем фактом, что в окрестности радиуса 0,5 м индивид имеет очень небольшое число контактов. В противоположность этому окружность вокруг инфицированного с радиусом 2 м включает в себя значительно больше потенциальных больных.

Как результат, малые сети ведут себя одинаково, распространение эпидемии сопровождается резкими всплесками и угасаниями между временными периодами. В противоположность этому большие сети демонстрируют плавный и постепенный процесс распространения.

Так на рис. 5 продемонстрирована большая сеть с контактом на расстоянии в 0,5 м, где можно наглядно увидеть, каким образом происходило заражение.

Из рис. 5 видно, что заражение представляет собой кластерный вид, который говорит, что часто инфекция не распространяется далее близких контактов зараженного индивидуума. Данный случай уже был описан с указанием на то, что индивидуумы контактируют только в своей области видимости и редко с лицами из других частей сети.

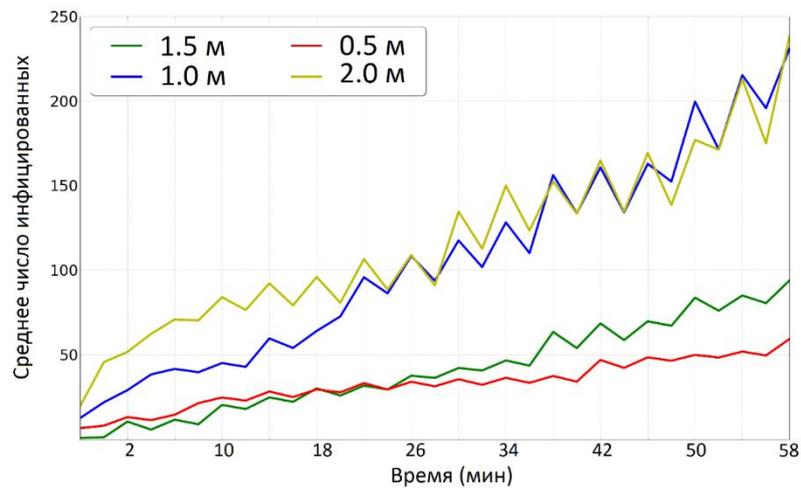


Рис. 3. Среднее количество инфицированных узлов в течение первого часа моделирования для малых сетей контактов

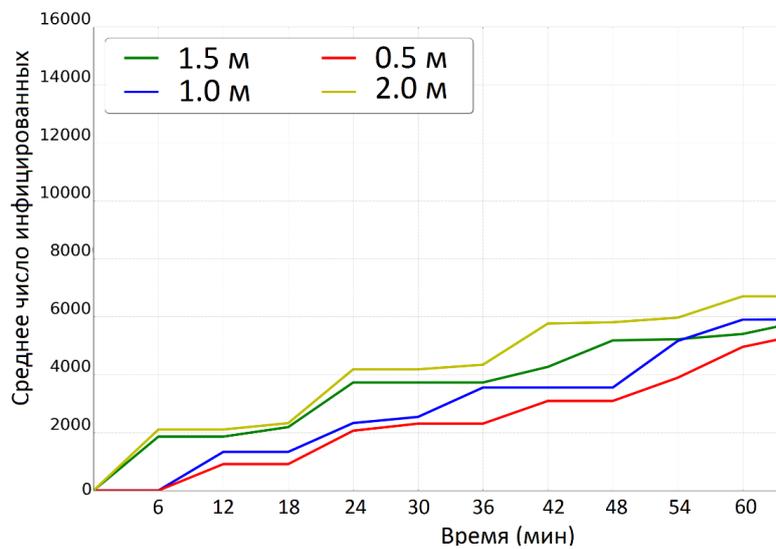


Рис. 4. Среднее количество инфицированных узлов в течение первого часа моделирования для больших сетей

- здоровый узел
- узел с активной инфекцией
- узел с инфекцией в инкубационном периоде

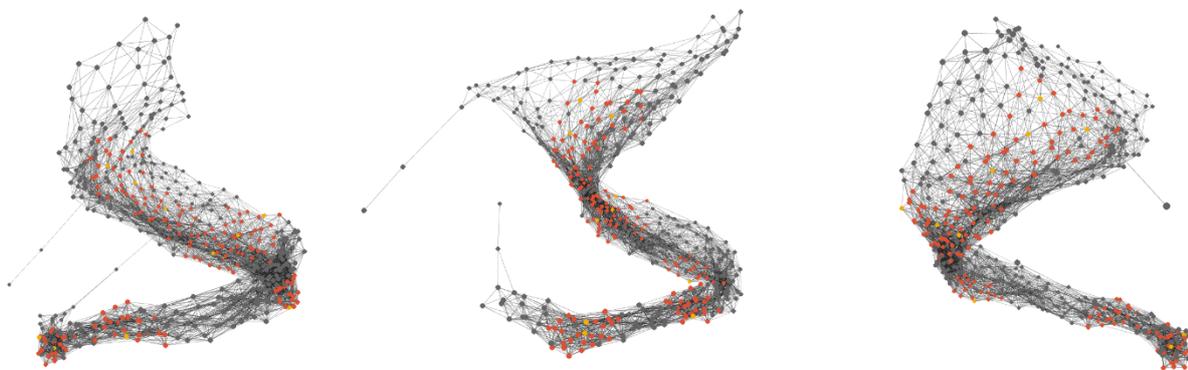


Рис. 5. Трехмерное представление части большой сети контактов (0,5 м) с окончанным процессом заражения, основанном на последнем методе

В ходе выполнения проекта были проведены теоретические и экспериментальные исследования методов оценки рисков для обеспечения комплексной безопасности на массовых мероприятиях. Научными результатами являются:

- метод создания контактных сетей, основанных на мультиагентном моделировании поведения толпы на открытых и замкнутых пространствах;
- метод моделирования распространения сигнала информации внутри контактной сети;
- метод моделирования распространения инфекции внутри контактной сети;
- методы априорной оценки рисков распространения сигнала (информации или инфекции) в контактных сетях.

Литература

1. *Mao T. et al.* Parallelizing continuum crowds // Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2010). Hong Kong, 2010. P. 231.
2. *Lysenko M.P., D'Souza R.M.P.* A framework for megascale agent based model simulations on graphics processing units // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008. Vol. 11. No 4. P. 10.
3. *Zhou S. et al.* Crowd modeling and simulation technologies // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. 2010. Vol. 20. No 4. P. 20.



Логинов Иван Павлович
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра информатики и прикладной математики
E-mail: ivan.p.loginov@gmail.com

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.П. Логинов

Научный руководитель – кандидат технических наук И.А. Перл

Цель работы – получение средства автоматической трансляции моделей из их функционального представления в объектно-ориентированное. Модель представлена в формате *XMILE*, который основан на *XML*, а стандартизован международной организацией (консорциум *OASIS*). В качестве результата обработки описания модели в этом формате необходимо получить исходный код на функциональном языке, который в дальнейшем будет транслироваться в исполняемое представление.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать формат определения моделей;
- реализовать средство автоматической загрузки описания модели и ее верификации;
- реализовать механизм анализа математических выражений;
- реализовать транслятор на целевой язык программирования.

Во время работы над проектом были исследованы существующие инструменты для трансляции представлений описаний моделей в код, средства автоматического чтения

содержимого *XML*-документов, формат *XMLE*, концепции и принципы построения анализаторов и трансляторов.

Системная динамика – это методология математического моделирования, направленная на описание и симуляцию динамического поведения моделей сложных систем и механизмов из экономической, социальной, природной, бизнес- и многих других областей. В настоящее время этот подход также широко применяется для описания сложных технических систем, таких как «Интернет вещей» и других областей, связанных с большими объемами данных.

В настоящее время существует некий набор решений: *Vensim*, *Stella*, *AnyLogic*, *AMESim* и другие. Большая часть решений имеют закрытый исходный код и поставляются согласно проприетарным лицензиям, что затрудняет доступ к ним со стороны исследователей и студентов. Решения же с открытым кодом порой недостаточно функциональны, и не могут полноценно конкурировать с коммерческими аналогами.

При этом все эти решения представляют собой либо *standalone*-приложение, либо *web*-приложение, и не рассчитаны на коллективную работу нескольких пользователей. То есть отсутствует возможность использовать вычислительные ресурсы, кроме тех, что есть в наличии на локальной машине. Что касается *web*-приложений – возможности их производительности ограничиваются площадками, на которых они размещаются, а также архитектурой, не предполагающей, например, параллелизма в процессе выполнения расчета моделей.

Существенной также является проблема совместимости: имеющиеся решения, как правило, используют специфический формат для хранения описаний моделей, результатов моделирования, который может являться при этом закрытым, что не позволяет осуществлять импорт и экспорт моделей между различными инструментами. Это приводит к тому, что группы ученых, специалистов по моделированию или студентов не могут обмениваться своими моделями для проведения исследований. Появляется необходимость перехода на определенное решение для моделирования, а следовательно, проблема высокой стоимости программного обеспечения, наличие наработок в других форматах, которые затруднительно (либо вовсе невозможно) конвертировать в поддерживаемые имеющимся программным обеспечением.

XMILE [1] – это открытый стандарт для обмена, поддержания функциональной совместимости и повторного использования моделей системной динамики и моделирования.

Технически *XMILE* – это представление модели системной динамики в виде *XML*-документа. Использование *XMILE* имеет ряд преимуществ для пользователей *STELLA* или *iThink*, а также других существующих инструментов для моделирования. Файлы моделей могут быть изучены или отредактированы в простом текстовом редакторе, где можно использовать возможности поиска и замены по тексту.

Поскольку *XMILE* – текстовый формат, становится возможным выполнять такую важную операцию, как поиск разницы (*diff*) между различными версиями *XML*-документов с моделями при помощи привычных и доступных инструментов, таких как *SVN* или *Git*. С течением времени стандарт становится все более и более распространенным, что приводит к дополнительным преимуществам. Набор моделей, доступных сообществу системной динамики, будет возрастать, как следствие, будут увеличиваться возможности совместного использования моделей с коллегами из сообщества, которые работают с различными инструментами для моделирования.

В целом для системной динамики использование *XMILE* достаточно выгодно, поскольку открывает ряд предпочтений:

- модели системной динамики могут быть повторно использованы для того, чтобы продемонстрировать, как различные начальные условия приводят к различным выходным данным для сложных систем;

- модели могут быть размещены в облачных хранилищах, доступ к которым открыт множеству организаций;

- появляется возможность создавать репозитории, доступные онлайн, в которых моделируются общие бизнес-решения;
- независимые поставщики программного обеспечения получают возможность создавать новые инструменты, которые помогают разрабатывать и применять модели системной динамики в бизнесе, на производстве, а также приложения, основанные на стандартизованном формате, для новых рынков (например, для рынков мобильных приложений и социальных сетей);
- позволяет работать с большими данными (*Big Data*).

Модели системной динамики позволяют по-новому анализировать большие данные (например, встраивать потоки данных в модель, расчет которой выполняется в данный момент). Это достаточно интересно, поскольку дает возможность определить влияние наших решений в реальном времени на будущие результаты и избежать нежелательных последствий от действий. При этом сам факт работы с большими данными не приводит к тому, что необходимо создавать большие и сложные модели.

В настоящее время существует проект, цель которого – обеспечить максимальную поддержку *XMILE* путем реализации набора трансляторов, которые преобразуют модели системной динамики из различных форматов в *XMILE* и наоборот. Также этот проект предполагает создание собственного архива моделей системной динамики, создание набора утилит для работы с *XMILE* (например, рефакторинга моделей), создание и публикацию встраиваемых *XMILE*-компонентов для программного обеспечения. Это сделает простым процесс поддержки *XMILE* для разработчиков в их собственных проектах.

Проект представляет большую ценность для системы облачного расчета моделей, так как позволяет реализовать их загрузку во множестве форматов (в том числе и на неиспользуемых ныне языках, таких как *DYNAMO*) и конвертацию для других систем моделирования (например, *STELLA*).

Более того, поскольку возможна трансляция любого типа моделей, поддерживаемых *sdXchange* [2], как и из формата *XMILE*, так и обратно в него, система облачного расчета моделей может использовать не только механизмы, ориентированные на работу с *XMILE*, но и другие. За счет создания конвейера трансляторов с помощью *XMILE* в качестве промежуточной формы, внешний интерфейс облачной системы расчета может транслировать модели, загруженные в одном формате, в модели формата для нужного механизма выполнения в любой транзитивной комбинации, поддерживаемой *sdXchange*. Например, чтобы выполнить модель, разработанную в одном формате, при помощи механизма выполнения, разработанном для второго формата (не *XMILE*), система может построить конвейер «*modelFormatA* –> *XMILE* –> *modelFormatB*».

Разумеется, не все модели необходимо транслировать. Пользователям, которые работают со средой моделирования с возможностью сохранения результатов в формате *XMILE*, не потребуются предварительные преобразования.

Существует инструмент с поддержкой формата *XMILE* для обеспечения процесса расчета моделей – это *PySD* [3], который представляет собой библиотеку для запуска моделей системной динамики на языке *Python* с ориентиром на улучшение интеграции больших данных и машинного обучения в процесс моделирования системной динамики. *PySD* транслирует файлы моделей *Vensim* в исходный код на языке *Python*, либо работает напрямую с моделями в формате *XMILE* и предоставляет методы для изменения, симуляции и наблюдения за полученными в виде исходного кода моделями. Выполняемые модели, созданные при помощи *PySD*, представлены как модули на *Python*, могут быть использованы для анализа моделей систем или процессов, их разработки и отладки. Сгенерированный *Python*-код хорошо читаем, что позволяет пользователю экспериментировать с моделью без необходимости каких-либо действий по трансляции исходного файла.

Использование *PySD* в качестве вычислительного ядра для системы облачного выполнения, на первый взгляд, может показаться хорошей идеей, однако природа языка *Python* не позволит достичь высоких показателей производительности. А это является критически важным при разработке облачной системы, ориентированной на использование ее большим количеством пользователей и работу с данными в реальном времени.

Связано это с несколькими техническими аспектами, заложенными в реализацию *Python*. Во-первых, *Python* – это язык с динамической типизацией. Это означает, что в момент выполнения программы интерпретатор не обладает информацией о типе данных, которыми он оперирует. Например, в ходе выполнения операции умножения переменных *a* и *b* интерпретатору известно, что *a* и *b* – объекты, однако у него нет информации, какого они типа. Так, интерпретатор должен анализировать структуру, называемую *PyObject_HEAD* для каждой переменной, чтобы получить эту информацию, и только после того выполнить вызов процедуры умножения. Наконец, после того, как выполняется операция умножения, интерпретатор *Python* создает новый объект, чтобы сохранить результат вычисления.

Очевидно, что это весьма большой набор действий для выполнения довольно простой операции. Динамическая типизация означает, что для выполнения многих операций потребуется подобное множество шагов.

Во-вторых, важным недостатком *Python*, с точки зрения высокопроизводительных вычислений, является то, что это интерпретируемый язык, а интерпретатор, в отличие от компилятора, не может выполнить анализ всего кода программы и произвести действия по его оптимизации.

Это не означает, что *Python* – язык, который не стоит использовать вовсе. Он очень гибок и прост для освоения (возможно, даже легче, чем «Си») и хорошо подходит для например, прототипирования, а в случае, когда требуется высокая производительность в вычислениях (уровня «Си» или «Фортрана»), можно использовать уже скомпилированные библиотеки из *Python* [4]. Это причина, по которой *Python* популярен во многих научных сообществах. Он дает возможность заниматься научными исследованиями с применением методов программирования.

Заключение

Самого наличия моделей системной динамики недостаточно для проведения исследований. Необходимо провести процедуру симуляции, то есть преобразовать описание модели в исполняемую форму. Для этого разрабатывается специальный транслятор, который выполняет операции над промежуточным представлением модели, например, оптимизацию. Простейшим способом получения промежуточного представления является отображение *xml*-документа с моделью на объектно-ориентированную модель кода, например, на *C#*. В общем случае для этого существует два способа: автоматический и ручной.

Первый вариант является предпочтительным, так как не требует затрат времени на реализацию – по существующей *xsd*-схеме, описывающей *XMILE* в соответствии со стандартом, можно получить исходный код автоматически. Но у данного способа есть недостаток – полученный код не очень удобен для работы, поскольку слишком объемен и требует рефакторинга. Поэтому приходится описывать модель документа *XMILE* вручную.

После процедуры получения объектной модели можно использовать ее как набор типов (классов, структур и т. д.) для сериализации или десериализации *XMILE*-документов стандартным сериализатором *NET*.

Была рассмотрена идея трансляции уравнений моделей системной динамики в формате *XMILE* в язык программирования из функциональной парадигмы. Ведутся исследования для разрешения зависимостей между стоками и потоками для реализации автоматического параллелизма – необходимо выявлять и разрешать зависимости порядка вычислений.

Реализован прототип, который выполняет отображение моделей в исходный код на языке *Erlang*, что дает возможность сосредоточиться на самой проблеме трансляции, а не на технических особенностях реализации параллельных вычислений.

Ниже приведен пример типов, полученных в результате трансляции модели *XMILE* в код на *C#*:

```
public class UsesArrays      {
  [XmlAttribute(AttributeName = "maximum_dimensions")]
  public int MaximumDimensions { get; set; }
  [XmlAttribute(AttributeName = "invalid_index_value")]
  public double InvalidIndexValue { get; set; } = 0;
}
public sealed class UsesConveyor  {
  [XmlAttribute]
  public bool Arrest { get; set; } = false;
  [XmlAttribute]
  public bool Leak { get; set; } = false;
}
```

Эту объектную модель достаточно легко использовать: нужно только лишь написать простой код для загрузки документа и продолжить работу:

```
– var serializer = new System.Xml.Serialization.XmlSerializer(typeof(XmileDocument));
– var xmileDoc = (XmileDocument)serializer.Deserialize(File.OpenRead("teacup.xml"));
```

Далее уже можно получить доступ к каждому компоненту динамической модели.

После того, как из *XMILE*-документа сформировано объектно-ориентированное представление модели системной динамики, необходимо сгенерировать исполняемый код. Главное – сделать его настолько производительным, насколько это возможно. Связано это с тем, что системная динамика применяется для моделирования стратегических процессов и социальных моделей, являющихся ресурсоемкими вычислениями. Поэтому необходимо подумать о возможности параллельного вычисления частей моделей. Для этого следует использовать возможности многоядерных процессоров и многопроцессорных систем.

Это означает, что результат трансформации из объектно-ориентированного представления в код должен быть представлен соответствующим образом, пригодным для параллельного выполнения. Поэтому целесообразно использовать функциональный язык программирования, парадигма которого представляет для этого соответствующие возможности – чистые функции, неизменяемые переменные.

Существует большое число способов реализовать параллельные вычисления, но необходимо подумать об их технических деталях: взаимодействии исполняемых узлов (поток/процессы), разделении общих данных и других классических проблемах. Хорошей идеей кажется использование языка *Erlang* в качестве целевого языка трансляции, потому что он изначально был разработан именно для параллельных вычислений и в настоящее время ведется работа над транслятором в этот язык.

Для простых моделей (например, без зависимостей между уравнениями) достаточно легко выполнить отображение уравнений на функции языка программирования, как в этом примере (для прототипа выбран *Nemerle*):

```
[Model]
class Teacup {
  private integ_teachup_temperature : Stateful = Functions.Integ(fun () { -heat_loss_to_room() },
180);
  public final_time() : double { 30 }
  public characteristic_time() : double { 10 }
```

```
public saveper() : double { time_step() }  
public heat_loss_to_room() : double { (teacup_temperature() - room_temperature()) /  
characteristic_time() }  
public room_temperature() : double { 70 }  
public teacup_temperature() : double { integ_teacup_temperature.State() }  
public time_step() : double { 0.125 }  
public initial_time() : double { 0 }  
}
```

Литература

1. OASIS XML Interchange Language (XMILE) for System Dynamics TC [Electronic resource] // OASIS [Official website].
URL: https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=xmile (accessed: 06.11.2017).
2. SDXchange [Electronic resource]: official website. URL: <http://sdxchange.github.io/SDXlate/> (accessed: 06.11.2017).
3. PySD: System Dynamics modelling in Python [Electronic resource] // GitHub James Houghton [Official page]. URL: <https://github.com/JamesPHoughton/pysd> (accessed: 06.11.2017).
4. PyCXX: write Python extensions in C++ [Electronic resource]: official website.
URL: <http://cxx.sourceforge.net> (accessed: 06.11.2017).



Лугова Маргарита Витальевна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра прикладной биотехнологии
E-mail: Lm154@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОСТАВА ЗАМОРОЖЕННОГО ДЕСЕРТА ДЛЯ ДИАБЕТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУНЖУТНОЙ МУКИ

М.В. Лугова

Научный руководитель – профессор Т.П. Арсеньева

Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 25 октября 2010 г. N 1873-р «Основы государственной политики Российской Федерации в области здорового питания населения на период до 2020 г.», создание диетических, лечебных и профилактических пищевых продуктов функционального назначения является одной из приоритетных задач внутренней политики государства.

В настоящее время в мире неуклонно возрастает заболеваемость сахарным диабетом. Число диабетиков в РФ за последние пять лет выросло на 825 тыс. человек. Малая подвижность, тяжелое питание, повсеместная доступность фастфуда – это основная причина заболевания, в том числе и у детей. Сахарный диабет занимает третье место по смертности после сердечно-сосудистых заболеваний и рака. Высокая его распространенность требует проведения лечебно-профилактических мероприятий.

В связи с этим проблема создания продуктов функциональной направленности приобретает особую актуальность.

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

Цель проекта – исследование и разработка состава замороженного десерта для диабетического питания с использованием кунжутной муки, улучшающей потребительские характеристики продукта. Этот десерт будет востребован не только диабетиками, но и потребителями, бережно относящимися к своему здоровью. В основу рабочей гипотезы положено исследование по подбору вида стабилизатора, доз внесения стевиозида, сиропа топинамбура и кунжутной муки в рецептуру молочного мороженого, рассчитанных теоретически по сухим веществам согласно ГОСТ 31457-2012 [1–4].

На первой стадии исследования установлено, что дозы внесения стевиозида и сиропа топинамбура в количестве 0,03 и 5 % к массе смеси замороженного десерта соответственно позволяют получить продукт с приятным вкусом и запахом [5–7]. Использование стабилизатора *PGX-1* (Германия) с дозой внесения 0,4 % к массе смеси способствует получению десерта с лучшими показателями по взбитости, сопротивляемости таянию, плотности и однородности консистенции [8, 9].

На втором этапе работы был осуществлен подбор концентрации кунжутной муки, доза варьировалась от 1 до 5 % с шагом 0,5 %. По органолептическим показателям и вязкости смеси была выбрана концентрация 1,5–2 %. Кунжутную муку вносили непосредственно в смесь после процесса гомогенизации. Замороженный десерт по вкусу и запаху соответствовал предъявляемым требованиям, а по консистенции наблюдалась излишняя крупитчатость [10]. Поэтому в дальнейшем ее вносили в нормализованную смесь после процесса гомогенизации перед фрезированием, предварительно заваривая водой в соотношении 1:10 в течение 15–20 мин. до влажности (80±1) %. Установлено, что срок годности замороженного десерта без сахара с использованием кунжутной муки составляет шесть месяцев при температуре – 18 °С.

Публикации

1. Лугова М.В. Выбор заменителя сахара и дозы внесения для замороженного десерта, при сахарном диабете I и II типа // Апробация. 2017. № 2 (53). С. 29–31.
2. Лугова М.В. Выбор заменителя сахара для замороженного десерта при сахарном диабете I и II типа [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4748/4748.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).
3. Арсеньева Т.П., Лугова М.В. Исследование концентрации и момента внесения кунжутной муки в замороженный десерт для диабетического питания [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3279/3279.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).
4. Лугова М.В., Арсеньева Т.П. Изучение влияния температуры на равномерность распределения кунжутной муки в молоке // Сборник тезисов докладов Региональной научной студенческой интернет-конференции «Современные информационные технологии». Вып. 7. Донецк, 2015. С. 102–104.

Литература

1. Арсеньева Т.П., Яковлева Ю.А. Разработка рецептуры мороженого с растительными компонентами // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 1 (325). С. 73–74.
2. Оноприйко А.В. и др. Производство молочных продуктов. Ростов-на-Дону, 2004. – 411 с.
3. Оленев Ю.А. и др. Справочник по производству мороженого. М., 2004. – 798 с.
4. Оленев Ю.А. Технология и оборудование для производства мороженого. М., 2001. – 323 с.
5. Ерашова Л.Д., Павлова Г.Н. Стевия — источник натурального подсластителя продуктов питания // Пищевая промышленность. 1997. № 5. С. 9.
6. Вожадаева Л.И., Сорочкина И.Г. О функциональных свойствах топинамбура // Проблемы и перспективы здорового питания. Кемерово, 2000. С. 43..

7. Арсеньева Т.П. и др. Топинамбур как средство лечения и профилактики различных заболеваний [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. № 1 (11). С. 8. URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/7405.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).
8. Арсеньева Т.П. Развитие теоретических основ и разработка технологий низколактозных молочных продуктов с регулируемым жирнокислотным составом: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2009. – 22 с.
9. Взор А.Л. и др. Применение стабилизаторов и эмульгаторов в современном производстве мороженого // Пищевая промышленность. 1998. № 2. С. 40–43.
10. Гаппаров М.М. и др. Натуральные продукты — пища XXI века // Пищевая промышленность. 1999. № 9. С.12.



Мазулина Вероника Васильевна
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: nikasummit@rambler.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

В.В. Мазулина

Научный руководитель – кандидат технических наук Ю.В. Литвинов

Цель проекта – разработка алгоритма автономного управления мобильным роботом, движущимся по пересеченной местности и способным выполнять следующие действия:

- следовать по траектории, заданной оператором;
- идентифицировать препятствия, мешающие дальнейшему продвижению по указанному маршруту;
- автономно корректировать траекторию движения при обнаружении помехи (строить траекторию объезда препятствия и возврата на первоначальный маршрут);
- строить карту местности и определять собственные координаты на ней в режиме реального времени.

Для решения выше обозначенных задач использовались такие технические средства, как ультразвуковые датчики, гироскоп, энкодер, система стереозрения, *GPS*. Экспериментальные исследования выполнялись на шестиколесной платформе *Odessey*. В качестве управляющего элемента был выбран контроллер *Arduino UNO*. Данная плата проста в программировании и хорошо подходит для создания прототипа.

На рис. 1 представлена разработанная функциональная схема мобильного робота.

Оператор формирует на компьютере траекторию движения, которую робот должен отработать. По каналу беспроводной сети *Wi-Fi* сформированная программа пересылается на контроллер. Далее робот функционирует в автономном режиме. Показания ультразвуковых датчиков, гироскопа, энкодера и платы *GPS* передаются на контроллер. На основе полученных данных он принимает решения о том, какой управляющий сигнал отослать на драйвер двигателей. Видеопоток с беспроводных *IP*-камер передается через сеть *Wi-Fi*

в режиме реального времени на компьютер. Полученные изображения обрабатываются компьютером в программе *OpenCV* автономно. В результате на выходе получаем расстояния до обнаруженных камерами объектов. Эти значения отправляются на контроллер, который на основе принятых значений и заложенных алгоритмов принимает решение о ходе дальнейшей работы.

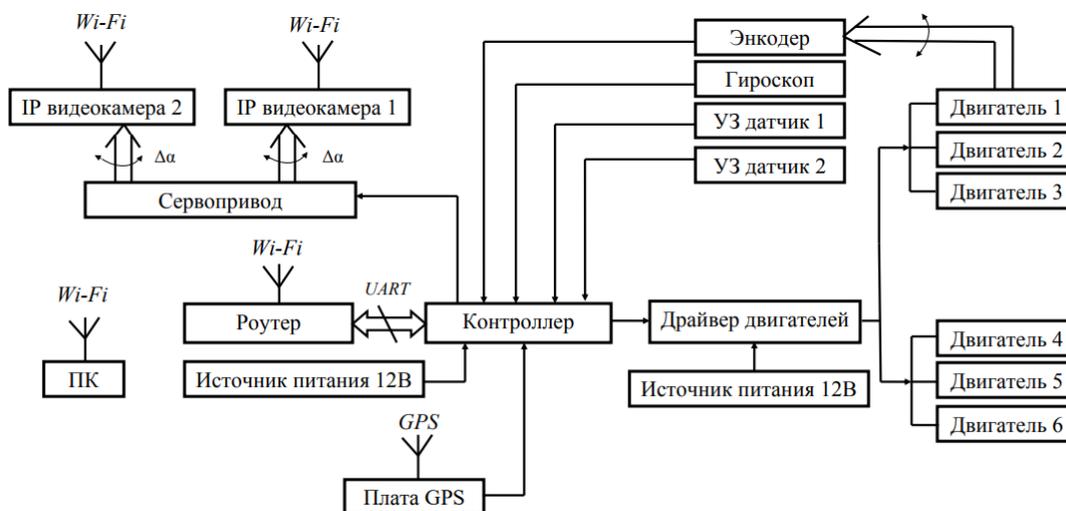


Рис. 1. Функциональная схема мобильного робота

При перемещении робота по заданной траектории сканирование впереди лежащей местности происходит с помощью пары видеокамер, размещенных в одной горизонтальной плоскости. Оптические оси камер параллельны плоскости движения.

Важным параметром работы системы стереозрения является расстояние между камерами (база). Чем больше эта характеристика, тем более далекие объекты может обнаруживать робот. Недостатком является то, что в таком случае робот не видит близкие препятствия, столкновение с которыми наиболее вероятно. Для того чтобы избежать подобной ситуации, между камерами установлен ультразвуковой датчик.

Для обнаружения статических препятствий на пути движения робота установим систему стереозрения и ультразвуковой датчик на вертикальную ось с рулевым механизмом. Это позволит увеличить угол обзора робота. Если при движении робота с камер или датчика поступит информация о том, что на минимально допустимом расстоянии обнаружена помеха, то он остановится и перейдет к алгоритму объезда препятствия.

При повороте рулевого механизма сначала на 90° вправо, а затем на 90° влево в массив данных вносится информация о расстоянии до препятствия и значении соответствующего ему угла. По возвращению установки в исходное положение в массиве происходит поиск угла θ , при котором помехи не обнаружены. Если такой угол найден, то робот поворачивает на этот угол и движется вперед. После он возвращается в исходное положение и, если новая помеха не найдена, по данным, снятым с гироскопа и энкодера, строит траекторию возврата на первоначально заданный маршрут. Если такой угол не обнаружен, то на драйвер двигателей поступает команда «Ехать назад». Затем снова производится сканирование окружающего пространства на предмет возможного пути объезда.

Для анализа поверхности движения техническая база робота была дополнена вторым ультразвуковым датчиком. Сенсор закреплен на оси, расположенной перпендикулярно плоскости мобильной платформы, перпендикулярно поверхности. Штанга с закрепленным датчиком вынесена на некоторое расстояние перед роботом с целью определения характера впереди лежащей местности заранее и прикреплена к вертикальному рулевому механизму ниже оси с видеокамерами и первым дальномером, как схематично показано на рис. 2.

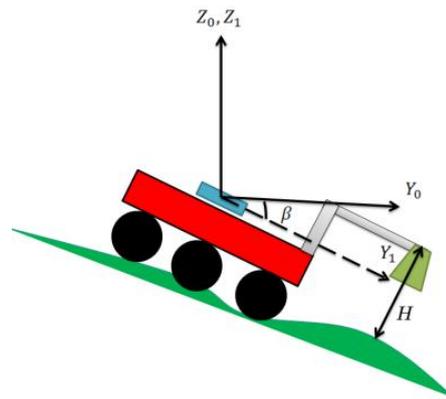


Рис. 2. Анализ поверхности движения ультразвуковым датчиком

Ультразвуковой датчик определяет расстояние до объектов, расположенных к сенсору под углом от 60° до 120° . Это соответствует максимально допустимому углу поверхности, которую может преодолеть робот без проскальзывания. Если угол наклона плоскости движения не попадает в указанный диапазон, то этот участок помечается как помеха и робот переходит к алгоритму объезда, описанному ранее.

Для того чтобы не попасть на опасный участок, в дополнение к ультразвуковому датчику используется гироскоп. С него снимаются данные о скорости изменения угла наклона мобильной платформы. Обратно пропорционально получаемым значениям будет снижаться скорость движения робота. Это позволит ему успеть оценить поверхность прежде, чем он выйдет на опасный участок.

Максимальное расстояние, при котором выбранная модель дальномера зафиксирует препятствие, 400 см. Если на этом расстоянии не будет обнаружено никаких объектов, датчик выдаст на выходе значение 3907. Основная функция второго ультразвукового сенсора – идентификация препятствий типа «ступенька» или резких обрывов.

Будем считать, что робот может беспрепятственно преодолеть обрыв, высота которого не превышает половины диаметра колеса d . Тогда расстояние от 0 до $E = 0,5d$ является безопасными для колесной платформы.

Во время движения на контроллер с ультразвукового датчика H постоянно поступают текущие значения расстояния от поверхности движения до плоскости датчика и угол тангажа β , определяемый гироскопом. На основе анализа и сравнения этих данных робот принимает решения о дальнейшем движении. Если скорость изменения угла β превысит допустимую или расстояние H превзойдет $E = 0,5d$, с контроллера на драйвер двигателей поступит команда «Стоп».

Для выявления особенностей работы датчиков при движении по пересеченной местности был проведен эксперимент по определению формы поверхности движения ультразвуковым датчиком. Важной характеристикой работы сенсора, перед которым стоит задача обнаружения препятствия, является частота импульсных повторов. Чем выше эта характеристика, тем точнее представление робота об окружающем пространстве и меньше вероятность выехать на опасный участок.

В ходе эксперимента наблюдалось изменение выходной характеристики дальномера при разной частоте измерения. В результате были получены графики изменения расстояния, регистрируемого датчиком при движении робота по холмистой поверхности, представленные на рис. 3(а–с).

В результате увеличения частоты испускания импульсов при движении робота по холмистой поверхности в момент времени $t = 8,8$ с показания на выходе дальномера значительно отклонились от реальных. Датчик определил расстояние до плоскости в 3907 см. Ранее подобное значение регистрировалось лишь при обнаружении препятствий типа «ступенька» или глубоких ям. Для того чтобы выявить причину этой ошибки, был

построен график, для которого вместо $H = 3907$ было взято среднее арифметическое значение соседних измерений (рис. 3д).

Из-за увеличения числа испускаемых импульсов график содержит незначительные колебания. Существенные отклонения не были найдены. Непредвиденное критическое значение было снято с ультразвукового датчика при движении робота вверх по наклонной плоскости. Причиной стало чрезмерно близкое расположение сенсора к поверхности движения.

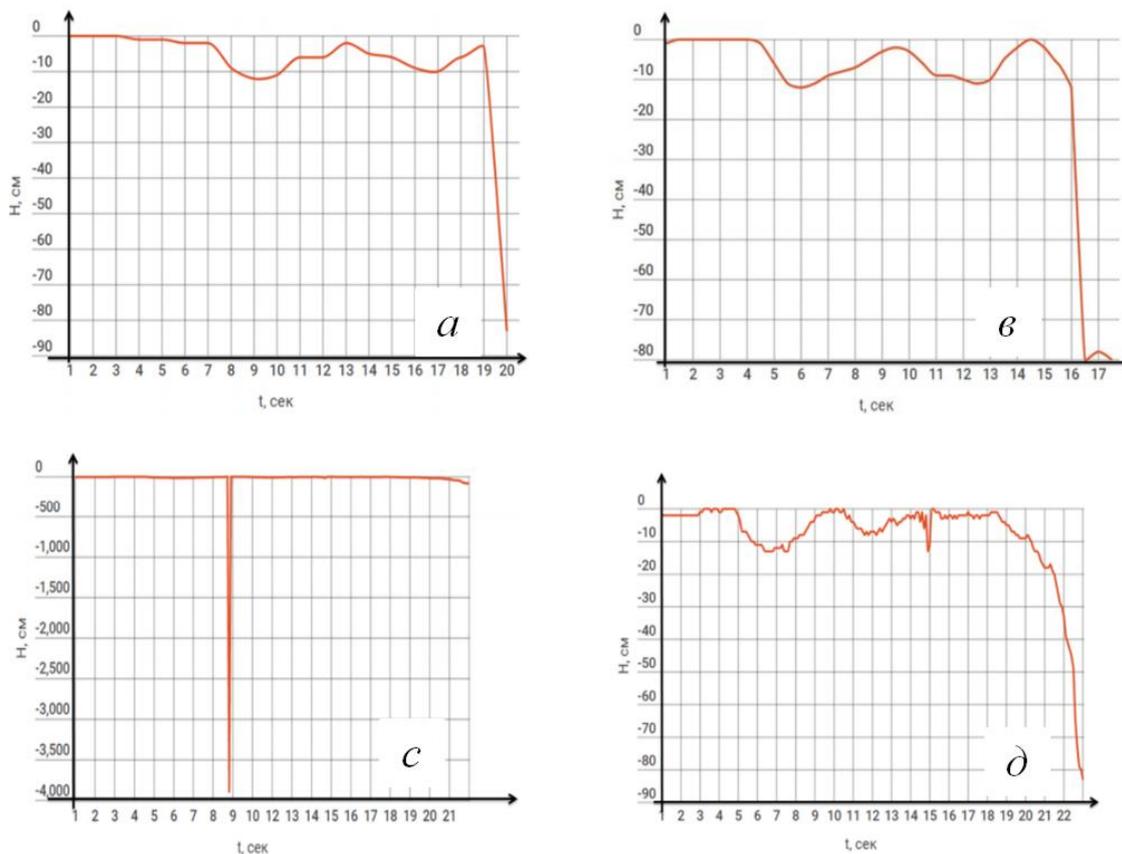


Рис. 3. Графики зависимости $H(t)$ при частоте излучения: а – один импульс в секунду; в – два импульса в секунду; с – 10 импульсов в секунду; д – 10 импульсов в секунду и при усредненном значении H и $t = 8,8$ с

Таким образом, экстремальные данные могут поступать с дальномера, когда он не может определить расстояние до объекта (если H превышает 400 см) или при H ниже 2 см. Увеличение ситуаций, при которых регистрируется $H=3907$, может привести к путанице в системе управления. Поэтому необходимо скорректировать описанный ранее алгоритм движения робота по пересеченной местности, рассмотрев ситуацию, при которой значение $H=3907$ свидетельствует об ошибке датчика, полученной при большой частоте испускаемого дальномером сигнала. Для того чтобы избежать остановки робота и перехода к объезду препятствия, необходимо провести следующее измерение расстояния, а затем сравнить полученные результаты. Если значение H не изменилось, то робот остановится и приступит к алгоритму объезда опасного участка. Если же величина полученного измерения будет лежать в допустимых для робота пределах, то он будет двигаться дальше по заданному маршруту.

Также в результате эксперимента была выявлена необходимость изменять частоту работы ультразвукового датчика прямо пропорционально изменению скорости движения робота. Это выполняется для того, чтобы, с одной стороны, успеть обнаружить опасный участок при движении на высоких скоростях, с другой – снизить нагрузку на обрабатывающий данные контроллер на низких скоростях.

Заключение

Результатом выполнения проекта стала разработка алгоритма обнаружения и объезда мобильным колесным роботом препятствий на плоскости и его движения по пересеченной местности. В отличие от существующих аналогов в данном исследовании упор делался не на улучшение механической составляющей платформы и увеличение степени ее подвижности, а на расширение возможностей сенсорных систем [1, 2]. Это позволит роботу заранее принимать решение о ходе дальнейших действий. Преимуществом подобного подхода является также возможность закладывания в алгоритм решения ситуаций, при которых робот не может преодолеть определенный участок заданной траектории.

В дальнейшем планируется доработать программное обеспечение мобильного робота, увеличить вычислительную мощность его компонентов и скорость передачи данных, разработать алгоритмы движения в среде с динамическими препятствиями, провести оценку ошибок слежения за положением робота и препятствиями и минимизировать их.

Полученный алгоритм может быть в дальнейшем использован при проектировании беспилотных автомобилей и систем автоматизированных транспортных средств.

Публикации

1. *Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Мищенко Г.М.* Алгоритмы управления четырехколесным роботом при движении по пересеченной местности // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 738–741.
2. *Mazulina V.V., Litvinov Y.V., Bushuev A.B.* Developing a movement algorithm for a wheeled robot moving over a rough terrain // 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2016. P. 5–9.
3. *Mazulina V.V., Litvinov Y.V., Chashchina M.M., Evstigneev M.I.* The control system of the mobile robot over a rough terrain // 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). 2017. P. 229–232.
4. *Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Чащина М.М.* Локация мобильного робота с использованием структурного анализа изображений // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 9. С. 858–862.
5. *Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Чащина М.М.* Алгоритм организации движения мобильного робота по пересеченной местности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 393–399.

Литература

1. *Iagnemma K., Dubowsky S.* Mobile robot in rough terrain: estimation, motion planning, and control with application to planetary rovers. 2004. – 111 p.
2. *Cook G.* Mobile robots: navigation, control and remote sensing. 2011. – 324 p.



Малахов Юрий Леонидович
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра процессов и аппаратов пищевых производств
E-mail: yma@sopura.com

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТРЕХФАЗНЫХ ПОТОКОВ (ВОЗДУХ-ВОДА-ИЗМЕЛЬЧЕННОЕ ЗЕРНО) ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИЯМ ПРОИЗВОДСТВА БИОЭТАНОЛА

Ю.Л. Малахов

Научный руководитель – профессор А.Г. Новоселов

Цели работы – снижение энергозатрат при переработке большого количества растительного сырья, увеличение рентабельности производств, снижение высокой себестоимости производимой продукции. Решение этих задач становится возможным при внедрении современных высокоэффективных технологий и оборудования, позволяющего их реализовывать. Важным условием, гарантирующим успешное достижение поставленных целей, является наличие на машиностроительном рынке несложного в изготовлении и надежного в эксплуатации малоэнергоемкого оборудования, позволяющего последовательно реализовывать несколько стадий технологического процесса, а именно: водно-тепловую обработку измельченного зерна, его осахаривание с помощью глюколитических ферментов и микробиологическое сбраживание.

На начальной стадии исследования проведен анализ подсистемного блока «Среда» (рис. 1), предложенного авторами, а также качественный анализ структуры солодовых суспензий и путей ее изменения в процессе водно-тепловой обработки зернового сырья [1–3].

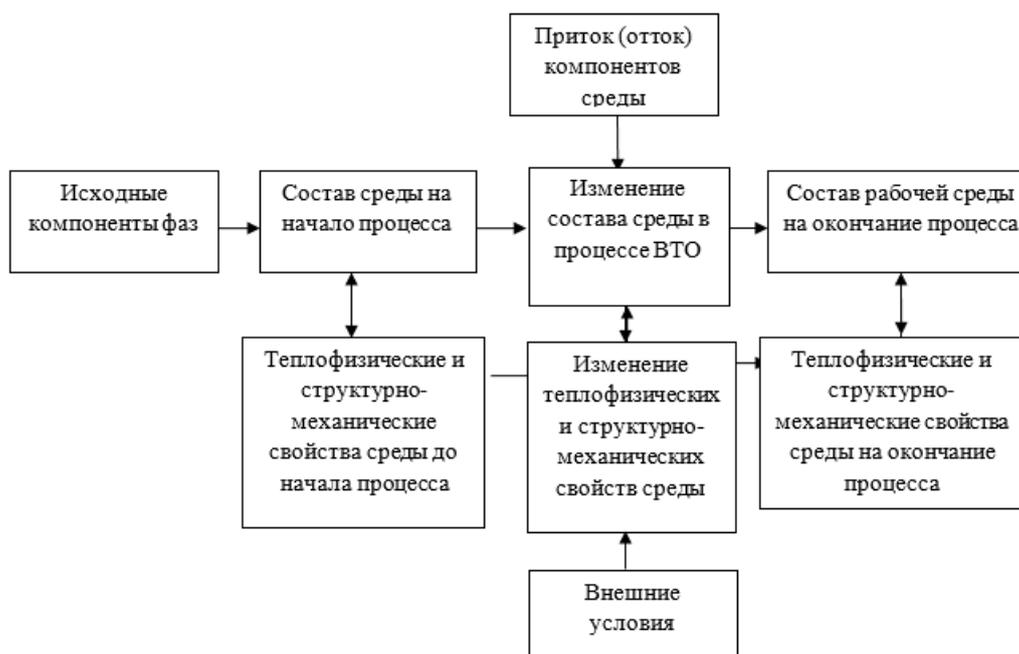


Рис. 1. Структура анализа подсистемного блока «Среда»

Разработана и сконструирована экспериментальная установка по исследованию гидродинамики газосуспensionных потоков в трубах трехтрубной модели кожухотрубного струйного инъекционного аппарата (рис. 2).



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

Экспериментальное изучение уноса газа свободной суспензионной струей, вытекающей из цилиндрического сопла, установленного соосно над вертикальной опускной трубой, выполнялось на экспериментальной установке, представленной на рис. 3. На рис. 2 показана фотография самой экспериментальной установки, смонтированной в лаборатории 4102 на кафедре «Процессы и аппараты пищевых производств» в Университете ИТМО.

Эксперименты по изучению уноса газа свободными суспензионными струями выполнялись по следующей методике. Предварительно устанавливалось сопло заданного диаметра и проходного сечения. Подготовленные к исследованию массы измельченного солода и воды тщательно взвешивались и смешивались в предварительно оттарированной емкости. Полученная солодовая суспензия заданного гидромодуля переносилась в емкость-накопитель II (рис. 3) вручную. После чего включался насос III, суспензия заполняла установку и циркулировала в ней в течение трех минут. Затем осуществлялось наблюдение за изменением структуры потоков в трубах, а также измерение следующих параметров:

- расхода суспензии с помощью электромагнитного расходомера (12);
- расхода воздуха, уносимого свободной суспензионной струей, при помощи барабанного газового счетчика ГСБ-400;
- давления в камерах 9 и 10 с помощью дифференциальных жидкостных манометров 16 и 17;
- температуры суспензии с помощью спиртового термометра с ценой деления 0,5 °С;
- уровня суспензии в опускной трубе (1) при помощи миллиметровой линейки.

Исследование начинали с максимального расхода суспензии (устанавливалась максимальная производительность циркуляционного насоса). Постепенно с заданной периодичностью после выполнения всех перечисленных выше измерений расход жидкости уменьшали путем перекрытия крана (14) и повторяли весь комплекс измерений. Затем изменяли гидромодуль суспензии и опять проводили измерения по выше изложенной методике.

По результатам измерений рассчитывали расход воздуха, проходящего через аппарат:

$$Q_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{t}, \quad (1)$$

где V_{Γ} – объем воздуха, прошедшего через счетчик газа за время t .

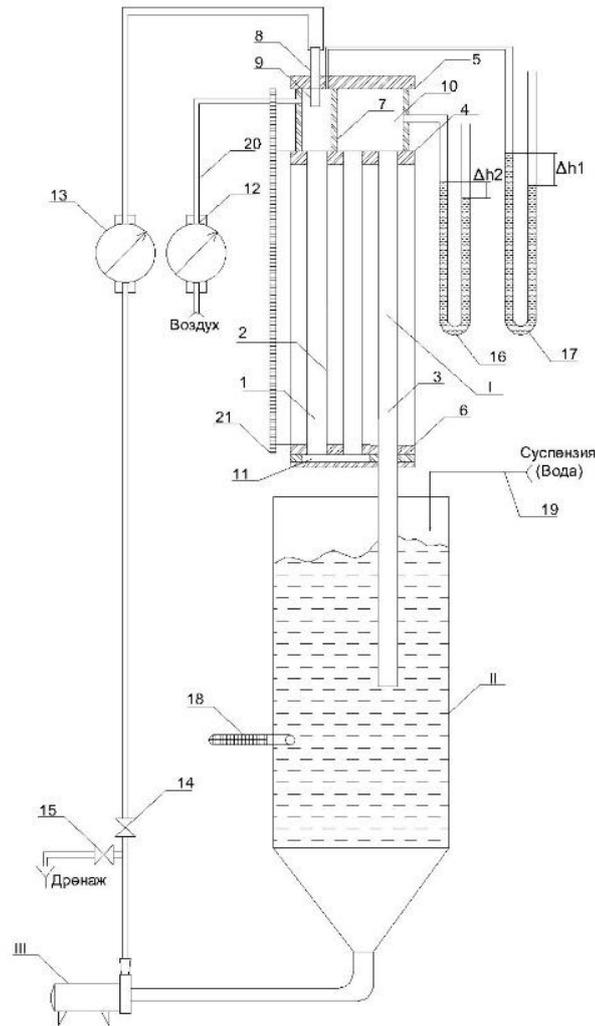


Рис. 3. Схематическое изображение экспериментальной установки по исследованию гидродинамики: I – модель струйно-инжекционного аппарата; II – емкость-накопитель; III – циркуляционный насос; 1 – опускная труба, 2 – подъемная труба; 3 – сливная труба; 4 – верхняя трубная решетка; 5 – верхняя крышка; 6 – нижняя трубная решетка; 7 – перегородка; 8 – съемное сопло; 9 – приемная камера; 10 – верхняя циркуляционная камера; 11 – переходной канал; 12 – жидкостной расходомер; 13 – газовый счетчик; 14 – регулирующий вентиль, 15 – сливной кран; 16, 17 – дифференциальные жидкостные манометры; 18 – термометр; 19 – линия подачи суспензии; 20 – воздушная магистраль

Зная Q_G , можно определить приведенную скорость газа в трубах с помощью следующего выражения:

$$w_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{S_{\Gamma p}} = \frac{4 \cdot Q_{\Gamma}}{\pi \cdot d_{\Gamma p}^2}, \quad (2)$$

где $S_{\Gamma p}$ – площадь сечения трубы, а $d_{\Gamma p}$ – ее диаметр.

Из данных по измерению Q_C (расход суспензии) рассчитывали скорость истечения суспензии из сопла v_o по уравнению:

$$v_o = \frac{Q_C}{S_o} = \frac{4 \cdot Q_C}{\pi \cdot d_o^2} \quad (3)$$

и приведенную скорость суспензии в трубах:

$$w_c = \frac{Q_c}{S_{TP}} = \frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot d_{TP}^2}. \quad (4)$$

Величина уровня газо-суспензионной смеси в опускной трубе измерялась визуально с помощью миллиметровой линейки (21). Зная значение H_{c1} (расстояние до среза сопла), учитывая фиксированное расположение сопла (8) и толщину фланца (4), можно рассчитать длину свободной суспензионной струи:

$$L_c = H_{Г1} - H_{c1}, \quad (5)$$

где $H_{Г1}$ – расстояние от верхней поверхности фланца (6) до среза сопла (8), равное 0,915 м.

Для обработки опытных данных необходимо было связать отраслевое понятие «гидромодуль» с физическим понятием «концентрация» твердой фазы (измельченный солод) в воде. Для этого был сделан пересчет, данные сведены в Таблицу.

Таблица

Концентрации дробленного солода в смеси при определенном гидромодуле

Гидромодуль, кг зерна : кг воды	Концентрация: кг солода/кг смеси
1:6	0,142
1:4	0,2
1:3,5	0,222
1:3	0,25
1:2,5	0,286

Заключение

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- обобщены и проанализированы имеющиеся в научно-технической и патентной литературе данные по технологии производства этанола и его машинно-аппаратурному оформлению;
- разработана и создана экспериментальная установка по изучению режимов работы кожухотрубного струйно-инжекционного ферментатора при проведении водно-тепловой обработки зерновой суспензии;
- разработаны физические и на их основе математические модели механизмов уноса газовой фазы свободными суспензионными струями;
- выполнены экспериментальные исследования по определению всех неизвестных расчетных параметров, имеющих место в предложенных математических зависимостях, и получены уравнения для их расчета;
- даны практические рекомендации по проведению выбранных технологических режимов в предложенной конструкции аппарата;
- разработано методическое указание для проведения лабораторных работ студентами;
- проведены комплексные экспериментальные исследования реологических свойств солодовых суспензий в диапазоне гидромодулей от 1:6 до 1:2,5 (массовых соотношений измельченного солода и воды) с целью определения коэффициентов эффективной вязкости;
- разработана модель механизма уноса газа свободными суспензионными струями в вертикальные трубы и выполнена ее экспериментальная проверка;
- впервые получены данные по реологическим свойствам солодовых суспензий;
- получены экспериментальные данные по гидродинамике движения трехфазных смесей, приготовленных на основе солодовых суспензий, в вертикальных трубах и в условиях струйного диспергирования.

Публикации

1. *Malakhov I.L., Ibragimov T.S., Novoselov A.G., Bulochnikova T.A., Fedorov A.V.* Shell-and-tube jet-injection devices are universal heat and mass transfer devices for the food industry // *Agronomy Journal*. 2017 (unpublished).
2. *Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Малахов Ю.Л., Чеботарь А.В.* Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Научное обоснование выбора метода исследований и разработка экспериментального стенда // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2017. № 1 (31). С. 42–51.
3. *Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Степаненко А.В., Гуляева Ю.Н.* Исследование реологических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе измельченного солода // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2016. № 4 (30). С. 83–90.
4. *Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Матевосов Т.С.* Гидродинамика трехфазных потоков в вертикальных трубах при струйном диспергировании газовой фазы // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2015. № 4 (26). С. 106–115.
5. *Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Малахов Ю.Л., Чеботарь А.В.* Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Экспериментальное исследование течения зерновых суспензий в трубах // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2017. № 2 (32). С. 40–49.
6. *Малахов Ю.Л., Новоселов А.Г.* Разработка оптимальных методов решения проблем производства в пивоваренной промышленности // *Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: материалы XVIII Международной научно-практической конференции*. Барнаул, 2017. С. 156–157.
7. *Малахов Ю.Л.* Влияние углеводного содержания среды на состав сброженного суслу, после приготовления смеси в КСИБА // *Инновационные технологии в пищевой промышленности: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Самара, 2016. С. 5–8.
8. *Малахов Ю.Л., Новоселов А.Г.* Исследование уноса газа суспензионными струями в вертикальные трубы кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата (КСИА) [Электронный ресурс] // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание*. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4671/4671.pdf> (дата обращения: 16.11.17).
9. *Малахов Ю.Л., Новоселов А.Г.* Анализ реодинамических характеристик водно-зерновых суспензий на основе ячменного солода // *Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: материалы XVII Международной научно-практической конференции*. Т. 1. СПб., 2017. С. 34–37.

Литература

1. *Агаев К.Э.* Совершенствование гидродинамических процессов обработки пищевого сырья в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. – 16 с.
2. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., 1960. – 464 с.
3. *Сивенков А.В.* Интенсификация гидродинамических процессов в струйных аппаратах пищевой промышленности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. – 16 с.



Марова Александра Андреевна
Факультет низкотемпературной энергетики
Кафедра теплофизики и теоретических основ тепло-хладотехники
E-mail: marova_a@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

А.А. Марова

Научный руководитель – профессор Ю.П. Заричняк

Цель проекта – разработка моделей и методик прогнозирования эффективной теплопроводности композиционных материалов с микро- и наноразмерными наполнителями в зависимости от их объемного содержания в материале.

В ходе исследования была изучена структура полимерных композиционных материалов (ПКМ), разработаны ее модели, а также методика прогнозирования эффективной теплопроводности ПКМ с микро- и наноразмерными наполнителями в зависимости от их объемного содержания в ПКМ на этапе проектирования материалов. С помощью данной методики была проведена приближенная оценка теплопроводности ПКМ с наноразмерными фуллереновыми наполнителями (фуллерены C_{60} , C_{70}), фуллереновых наполнителей для ПКМ (высшие фуллерены и гиперфуллерены), а также многокомпонентных ПКМ на основе акриловой смолы с микроскопическими наполнителями: керамическими и силиконовыми полыми микросферами. Исследование теплопроводности ПКМ с полыми микросферами доказало неэффективность применения подобных материалов в качестве теплоизоляции.

В настоящее время особую актуальность приобретает разработка технологий синтеза ПКМ с улучшенными свойствами. Для этой цели используются различные добавки. Композиты на основе полимерных матриц с высокотеплопроводными компонентами (порошки меди, нитридов, углеродные добавки) широко разрабатываются и исследуются, изучается комплекс их прочностных и теплофизических свойств. Все большее практическое применение находят новые композиционные материалы, содержащие микро- и наноразмерные компоненты (фуллерены, нанотрубки).

Актуальной становится задача оценки механических и физических свойств таких материалов еще на этапе проектирования и разработки композиционного материала с заранее заданными свойствами. Первым этапом создания таких материалов является моделирование их структуры и прогнозирование интересующих свойств.

Теплопроводность является одним из важнейших параметров для сертификации и использования материалов электрического, антифрикционного и радиотехнического (поглотители СВЧ-излучения) назначения.

Известны публикации, доказывающие эффективность применения наноразмерных добавок для улучшения механических и теплофизических свойств ПКМ [1–3].

Так, например, в [1] предложено использовать фуллерены C_{60} , C_{70} или их смесь в качестве наполнителя для материала конструкционного и антифрикционного назначения – полиамида 6-блочного (капролона). Использование даже малого количества фуллеренов, фуллереновой сажи (от долей до нескольких процентов) в качестве добавки в матрицу полиамида 6-блочного приводит к существенному (на десятки процентов) улучшению его механических и электрических свойств: возрастает твердость, прочность при изгибе и сжатии, электрическая прочность, теплопроводность.

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

Для прогнозирования теплопроводности ПКМ необходимо знать теплопроводность связующего компонента (полимера) и высокотеплопроводного нанонаполнителя. Теплофизические свойства полимеров достаточно хорошо изучены, информация о них есть в справочной литературе. Однако для наноразмерных компонентов эти сведения крайне немногочисленны. Кроме того, показатели для одних и тех же материалов существенно (до двух порядков!) различаются между собой в разных литературных источниках.

В рамках данного проекта были исследованы фуллерены и фуллереновые структуры, ПКМ с наноразмерными добавками. Рассматривались фуллереновые молекулы с различным числом атомов углерода: фуллерены (C_{60} – бакминстерфуллерен, или *buckyball*, и C_{70} – *rugbyballene*), высшие фуллерены (рис. 1) и гиперфуллерены (структуры, представляющие собой концентрические фуллереновые оболочки, это так называемые луковичные фуллерены, или *nano-onions*, рис. 2).

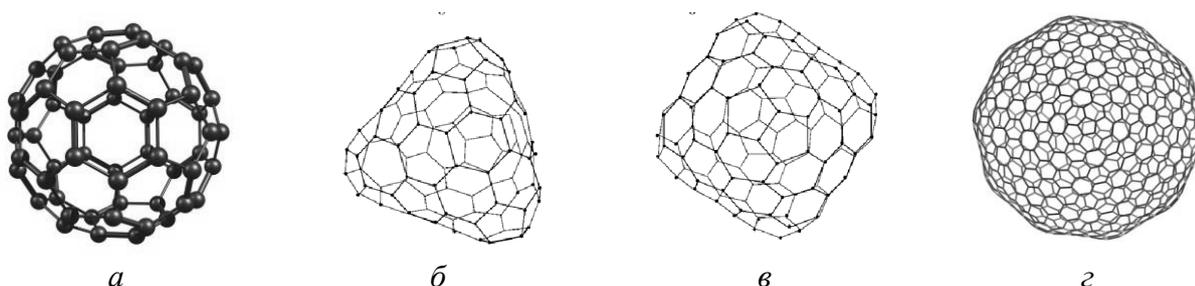


Рис. 1. Модели молекул фуллеренов: а – C_{60} , б – C_{100} [4], в – C_{124} [4], г – C_{800}

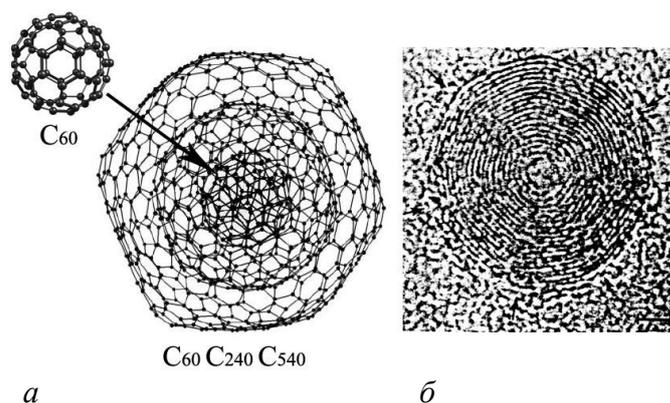


Рис. 2. а – модели молекулы: фуллерена C_{60} и луковичного фуллерена $C_{60}C_{240}C_{540}$ [5]; б – электронно-микроскопическое изображение луковичных фуллеренов [6–8]

Оценки [2, 9, 10] показывают, что теплопроводность наноразмерных включений выше теплопроводности полимерной матрицы, таким образом, можно ожидать, что добавка включений должна приводить к повышению эффективной теплопроводности полимерного композиционного материала.

В ходе данного исследования были разработаны модели структур фуллеренов, высших фуллеренов и «луковичных», а также осуществлена приближенная оценка теплопроводности с помощью методов теории обобщенной проводимости [11] для фуллерена C_{60} , высших фуллеренов (C_{80} , C_{140} , C_{180} , C_{240} , C_{260} , C_{320} , C_{380} , C_{420} , C_{500} , C_{540} , C_{560} , C_{620} , C_{720} , C_{740} , C_{780} , C_{860} , C_{960} , C_{980}) и «луковичных». Результаты расчета теплопроводности приведены на графиках (рис. 3, 4). С результатами исследования структуры и теплопроводности высших фуллеренов подробнее можно ознакомиться в статье [12]. Также была проведена оценка эффективной теплопроводности ПКМ на основе капролона с добавками фуллеренов C_{60} и C_{70} . Полученные значения теплопроводности сопоставлены с теми немногочисленными экспериментальными и теоретическими значениями, которые удалось найти в литературе.

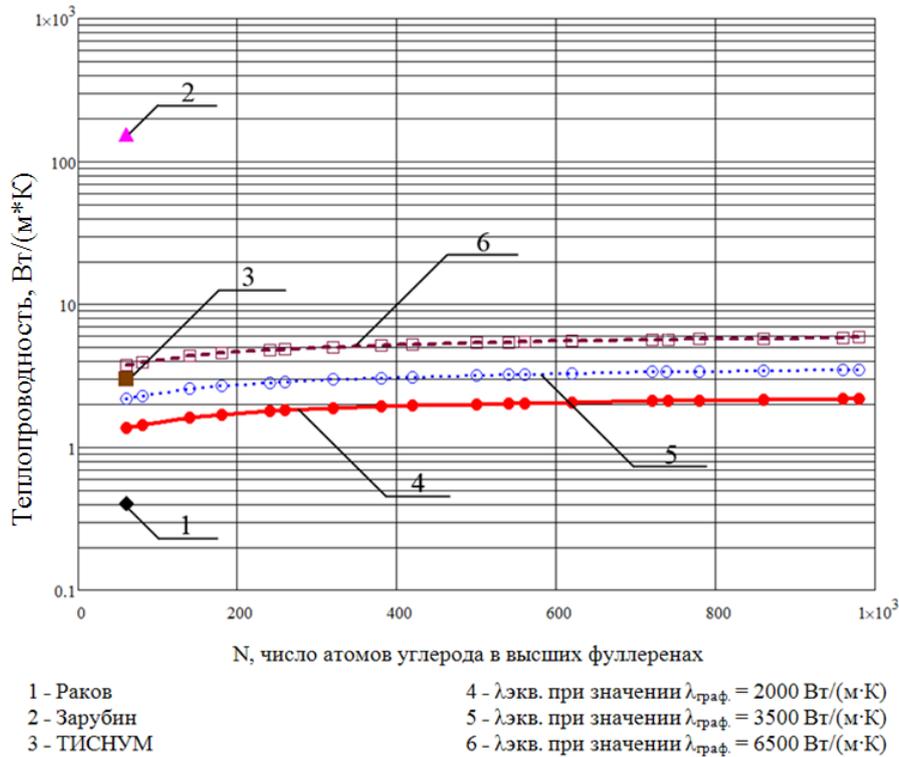


Рис. 3. График зависимости теплопроводности фуллеренов от числа атомов углерода, в них содержащихся [12]

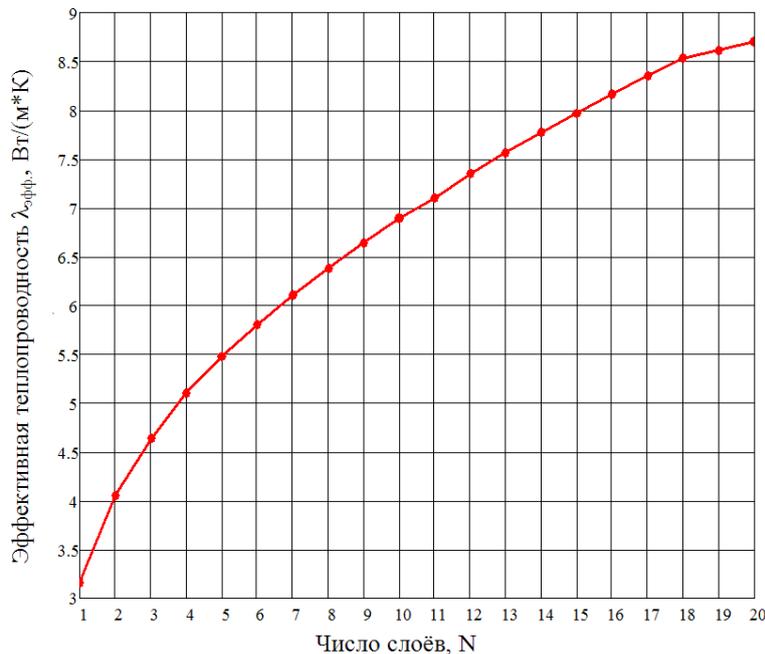


Рис. 4. График зависимости теплопроводности фуллереновых «луковиц» от числа фуллереновых слоев

Результаты расчетов эффективной теплопроводности для рассматриваемого ПКМ были опубликованы в [13, 14]. Ниже приведены полученные в ходе исследования графики зависимости эффективной теплопроводности композиционного материала от объемной доли фуллереновых наполнителей.

Помимо ПКМ с наноразмерными добавками было проведено исследование структуры и эффективной теплопроводности ПКМ с микроскопическими наполнителями. Изучены многокомпонентные полимеркомпозиты на основе акриловой смолы, наполненные

керамическими (боросиликатными) вакуумированными и силиконовыми (наполненными воздухом) микросферами (рис. 7).

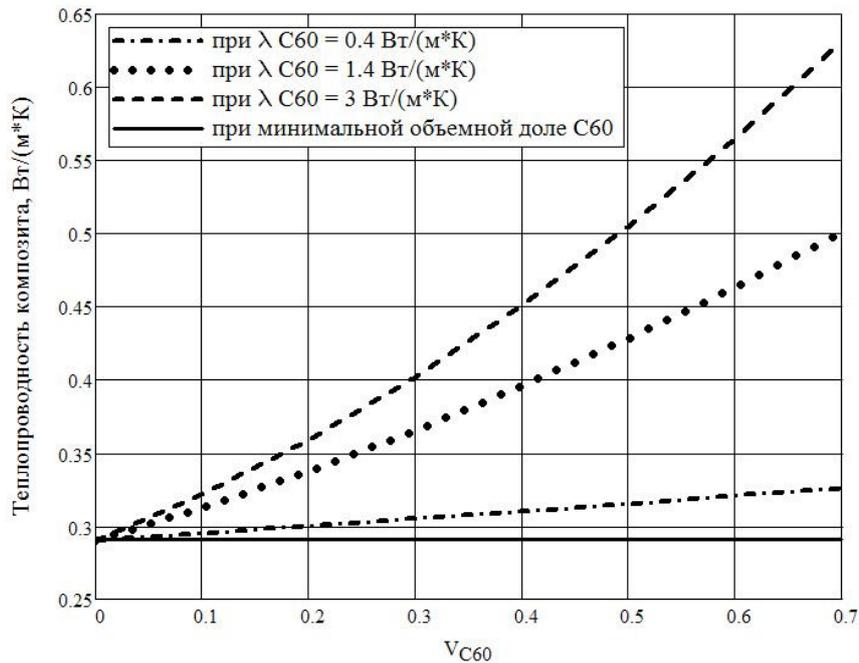


Рис. 5. График зависимости эффективной теплопроводности капролона с наполнителем C_{60} от его объемной доли [13]

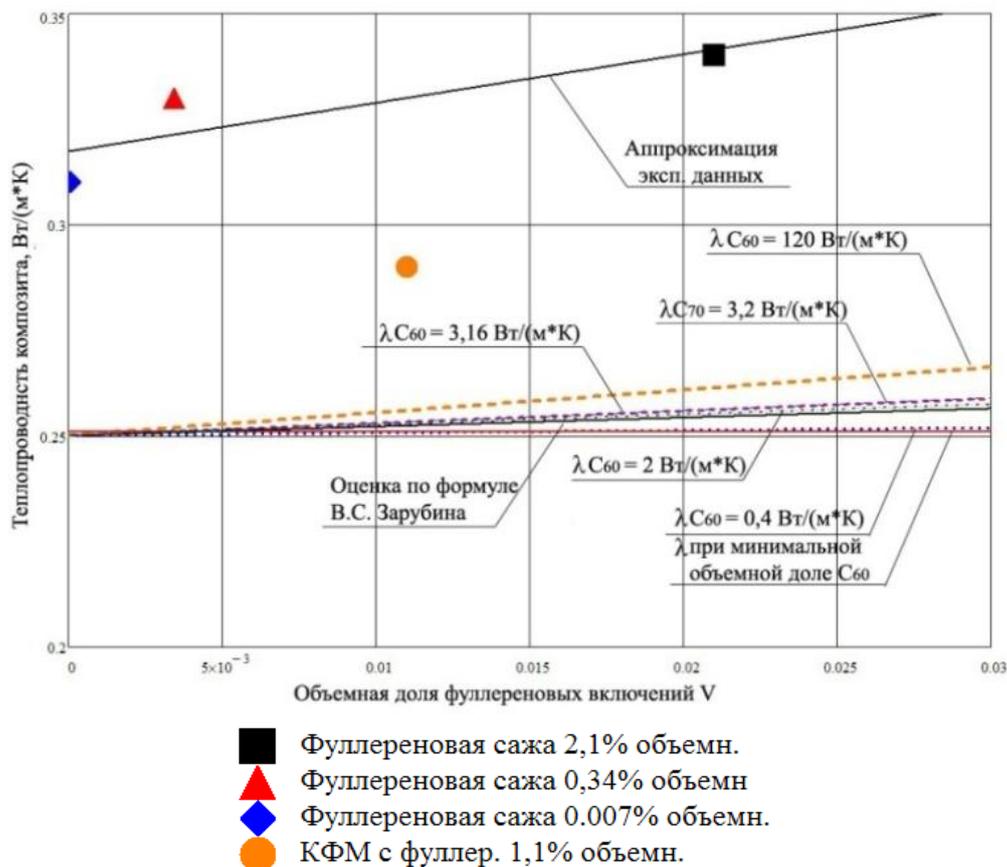
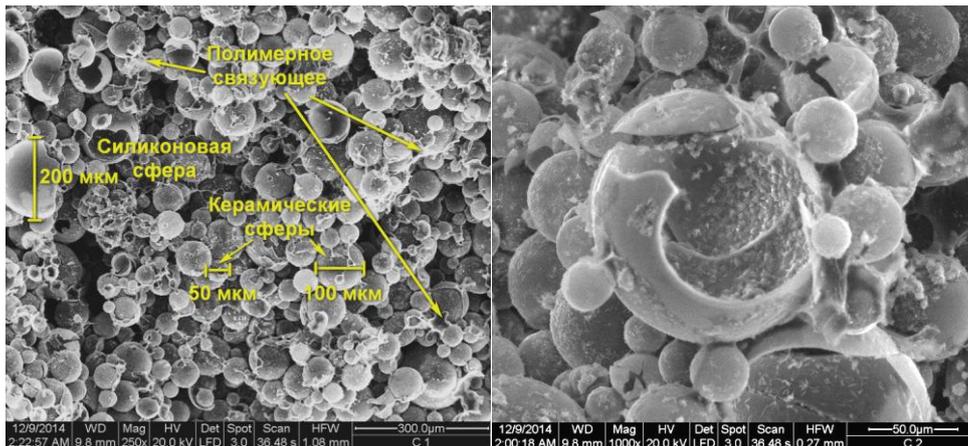


Рис. 6. График зависимости эффективной теплопроводности капролона с фуллеренами C_{60} и C_{70} от их объемной доли [14]

Такие ПКМ позиционировались отдельными производителями как инновационные теплоизоляционные материалы. Проведенный расчет и измерения показали, что теплофизические свойства этих инновационных теплоизоляторов, заявленные производителями, не соответствуют действительности (об этом свидетельствуют также экспериментальные данные независимых экспертов). Исследование теплопроводности ПКМ с полыми микросферами показало, что даже при наполнении полимерной матрицы микросферами с весьма тонкими стенками (с относительной толщиной $\delta = 0,05$ от радиуса сферы) получить величину эффективной теплопроводности ПКМ λ ниже $0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ практически невозможно. При увеличении объемной доли керамических микросфер можно ожидать увеличение теплопроводности ПКМ до уровня $\lambda = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Подробнее с результатами данного исследования можно ознакомиться в статье [15].



а

б

Рис. 7. Фотографии структуры композиционного материала с боросиликатными и силиконовыми микроскопическими сферами, полученные с помощью электронного микроскопа [15]: а – масштаб: 300 мкм; б – масштаб: 50 мкм

Оценки теплопроводности фуллереновых молекул и нанотрубок были выполнены на основе моделей и расчетных методик теории обобщенной проводимости [9, 16, 17]: с помощью разбиения простейшей плоской элементарной ячейки материала (системы с дальним порядком) адиабатическими и изотермическими плоскостями.

Оценки эффективной теплопроводности полимерных композиционных материалов с микро- и наноразмерными добавками могут быть получены по рекомендациям [18, 19].

Экспериментальное исследование теплопроводности полимерного композиционного материала на основе акриловых смол с дисперсным наполнителем в виде смеси микросфер двух видов проводилось с помощью прибора ТФП-3 (в основу работы которого положен стационарный сравнительный метод) и измерителя теплопроводности ИТ- λ -400 в режиме монотонного нагрева (для измерения теплопроводности в измерителе данного прибора использован метод динамического калориметра) [15].

Фотографии структуры ПКМ на основе акриловых смол с микроскопическими сферами (рис. 7) были получены методами электронной микроскопии (с помощью сканирующего электронного микроскопа *Quanta 200*).

Для оценки теплопроводности был разработан алгоритм расчета, который затем был реализован в системе компьютерной алгебры *Mathcad* и в математическом пакете *Scilab*.

Заключение

В результате выполнения проекта были разработаны модели и методика прогнозирования эффективной теплопроводности композиционных материалов с микро- и наноразмерными наполнителями в зависимости от их объемного содержания в ПКМ.

Изучена структура, предложена модель структуры, а также проведена приближенная оценка теплопроводности с помощью методов теории обобщенной проводимости для следующих объектов исследования:

- фуллерены;
- высшие фуллерены;
- луковичные фуллерены;
- ПКМ с наноразмерными (фуллереновыми) наполнителями;
- керамические (боросиликатные) вакуумированные микроскопические сферы;
- силиконовые микроскопические сферы, наполненные воздухом;
- многокомпонентные ПКМ на основе акриловой смолы с микроскопическими наполнителями: керамическими и силиконовыми полыми микросферами.

Также было выполнено патентное исследование, в рамках которого осуществлялся поиск прототипов для создания нового ПКМ; проведено выявление патентоспособности нового вещества, которое возможно создать с помощью результатов данного исследования.

Публикации

1. Волков Д.П., Заричняк Ю.П., Марова А.А. Структура и теплопроводность многокомпонентных полимеркомпозитов, наполненных керамическими и силиконовыми полыми микросферами // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 38–41.
2. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Оценка коэффициента теплопроводности полимерных композиционных материалов, наполненных фуллеренами C_{60} // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Т. 2. СПб., 2016. С. 22–26.
3. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Теплопроводность полимерных композиционных материалов, наполненных фуллеренами C_{60} // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2016. С. 211–213.
4. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Теплопроводность высших фуллеренов // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 4. СПб., 2017. С. 123–125.
5. Волков Д.П., Заричняк Ю.П., Марова А.А. Структура и теплопроводность полимеркомпозитов с полыми микросферами // III Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»: материалы конференции. СПб., 2015. С. 198.
6. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Структура и теплопроводность высших фуллеренов // IV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ»: материалы конференции. СПб., 2017. С. 44–45.
7. Волков Д.П., Заричняк Ю.П., Марова А.А., Старых И.Г. Структура и теплопроводность свободных засыпок полых микросфер // IV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ»: материалы конференции. СПб., 2017. С. 27–28.
8. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Оценка теплопроводности «луковичных» фуллеренов // IV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ»: материалы конференции. СПб., 2017. С. 42–43.
9. Марова А.А. Исследование теплопроводности неоднородных полимерных и поликристаллических материалов // Термодинамика и материаловедение: тезисы докладов 10-го Всероссийского семинара с международным участием. СПб., 2015. С. 182.
10. Марова А.А., Заричняк Ю.П. Оценка коэффициента теплопроводности полимерных композиционных материалов, наполненных фуллеренами C_{60} [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4010/4010.pdf> (дата обращения: 15.10.2017).

Литература

1. Патент на изобретение 2316571 Российская Федерация. Полиамидный композиционный материал (варианты) / К.В. Некрасов и др. Оpubл. 10.02.2008.
2. Патент на изобретение 2523477 Российская Федерация. Способ получения сверхтвердого композиционного материала / В.Г. Данилов и др. Оpubл. 10.09.2013.
3. Композиты ПА и фуллеренов [Электронный ресурс] // NC NEWCHEMISTRY.ru. Новые химические технологии: аналитический портал химической промышленности. URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=957&cat_id=&sword=%EF%EE%EB%E8%E0%EC%E8%E4 (дата обращения: 31.05.2016).
4. Глухова О.Е. и др. Структура фуллеренов высоких групп симметрии // Журнал структурной химии. 2005. Т. 46. № 3. С. 514–520.
5. Альес М.Ю. и др. Молекулярно-динамическое моделирование фуллереновых структур // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15. № 1. С. 41–46.
6. Кац Е.А. Леонард Эйлер и современные представления о молекулярной структуре фуллеренов // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 2. С. 51–57.
7. Кац Е.А. Леонард Эйлер и современные представления о молекулярной структуре фуллеренов // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 3. С. 52–57.
8. Кац Е.А. Леонард Эйлер и современные представления о молекулярной структуре фуллеренов // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 4. С. 57–62.
9. Tea N.H. et al. Thermal conductivity of C₆₀ and C₇₀ crystals // Applied Physics A. 1993. Vol. 56. No 3. P. 219–225.
10. Головин Н.Н. и др. Оценки эффективного коэффициента теплопроводности композита, модифицированного фуллеренами // Композиты и наноструктуры. 2012. № 4. С. 15–22.
11. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. Л., 1974. – 264 с.
12. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Теплопроводность высших фуллеренов // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 4. СПб., 2017. С. 123–125.
13. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Теплопроводность полимерных композиционных материалов, наполненных фуллеренами C₆₀ // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2016. С. 211–213.
14. Заричняк Ю.П., Марова А.А. Оценка коэффициента теплопроводности полимерных композиционных материалов, наполненных фуллеренами C₆₀ // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Т. 2. СПб., 2016. С. 22–26.
15. Волков Д.П. и др. Структура и теплопроводность многокомпонентных полимеркомпозитов, наполненных керамическими и силиконовыми полыми микросферами // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 38–41.
16. Rayleigh J.W. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium // Philosophical Magazine. 1892. Vol. 32. P. 481–491.
17. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. Vol. 1. London, 1892. – 578 p.
18. Заричняк Ю.П. Структура, теплофизические свойства и характеристики композиционных материалов и сплавов: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1989. – 470 с.
19. Волков Д.П. и др. Расчет теплопроводности наполненных полимеров // Известия АН Латвийской ССР. Механика композиционных материалов. 1979. № 5. С. 939–942.



Мелихова Алина Семеновна
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра высшей математики
E-mail: alina.s.melikhova@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ИЗОГНУТОЙ ЦЕПОЧКИ РЕЗОНАТОРОВ, ПОМЕЩЕННОЙ ВО ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

А.С. Мелихова

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

Введение

На сегодняшний день внимание исследователей в различных областях науки нацелено на изучение возможностей, предоставленных квантовой механикой. Уже появились системы, существование которых ранее было просто немыслимым (например, квантовые точки [1], квантовые провода [2], графен [3], нанотрубки [4], фуллерен [5] и т. д.). Среди всех этих структур можно выделить так называемый наностручок – систему, представляющую собой нанотрубку, заполненную молекулами фуллерена. Есть ряд экспериментальных работ [6, 7], описывающих процесс создания подобных систем и их свойства, однако их полный спектральный анализ довольно труден. Поэтому очень важной задачей является построение модели, которая, с одной стороны, будет упрощением исходной задачи, а с другой, будет обладать спектральными характеристиками, соответствующими реальной системе.

В данной работе рассматривается спектральная задача для системы, имеющей вид цепочки с однократным изломом, составленной из идентичных слабо связанных шарообразных резонаторов (под слабой связью понимаем то, что резонаторы соединены точечным проколом (сравни [8])). В точках их сочленения предполагается наличие δ -потенциала, причем параметры, описывающие его, во всех точках одинаковы. Также считается, что на границе элементарной ячейки цепи должно быть выполнено условие Неймана. И наконец вся эта система помещена во внешнее магнитное поле. Основной целью данной работы является исследование зависимости спектральных свойств системы от возможных внешних и внутренних факторов, как то: наличие внешнего магнитного поля, влияние δ -образных потенциалов, сосредоточенных в точках сочленения резонаторов, и пространственная конфигурация системы (излом).

Построение модели

В работе рассматривается система, в виде изогнутой под углом γ цепочки слабо связанных идентичных шарообразных резонаторов (рис. 1). Будем считать, что элементарной ячейкой цепочки является шар Ω единичного радиуса, причем на его границе должно быть выполнено условие Неймана. Нас интересует решение уравнения Шредингера $\hat{H}\psi = E\psi$ для подобной системы при наличии внешнего магнитного поля $\frac{1}{2}\vec{B} \times \vec{r}$, а точнее, спектр оператора \hat{H} . Считается, что поле направлено перпендикулярно плоскости, которой принадлежат все точки сочленения резонаторов \mathbf{x}_j .

Математическую модель, описывающую состояние нерелятивистской бесспиновой частицы, помещенной в указанную цепочку в присутствии внешних полей, будем строить на основе теории самосопряженных расширений симметрических операторов [9]. Рассмотрим исходный оператор (пока шары еще не «взаимодействуют» между собой):

$$\hat{H} = \bigoplus_{j=-\infty}^{+\infty} (\hat{H}_j), \quad \text{dom}(\hat{H}) = \bigoplus_{j=-\infty}^{+\infty} L_2(\Omega_j),$$

где $\hat{H}_j = \frac{1}{2m} \left(-i\hbar\nabla - \frac{e}{2c} \vec{B} \times \vec{r} \right)^2$ – Гамильтониан для элементарной ячейки цепочки.

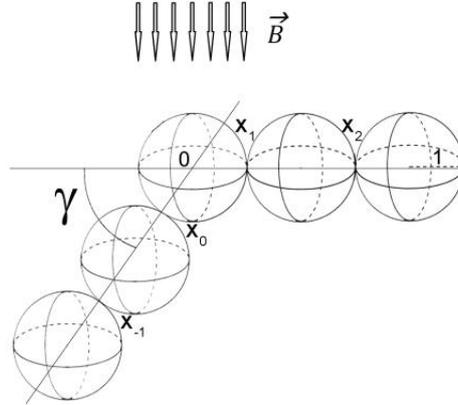


Рис. 1. Геометрия системы

Не умаляя общности, выберем систему измерений, в которой $m = 1/2$, $\hbar = 1$, $eB/c \rightarrow B$, $E \rightarrow \lambda$. Сузим оператор \hat{H} на множество всех гладких функций из области определения, которые обращаются в нуль в точках соединения резонаторов \mathbf{x}_j . Сужение \hat{H}_0 такого оператора – это симметрический оператор с индексами дефекта (∞, ∞) , а роль дефектных элементов играют функции Грина $G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda_0)$.

Область определения сопряженного симметрическому оператору \hat{H}_0 оператора \hat{H}_0^* может быть описана с помощью формулы фон Неймана [10]: $\text{dom}(\hat{H}_0^*) = \text{dom}(\hat{H}_0^F) \dot{+} N_{\lambda_0}$, где \hat{H}_0^F – расширение по Фридрихсу оператора \hat{H}_0 , а N_{λ_0} – дефектное подпространство, соответствующее регулярному значению λ_0 [11]. Причем видно, что функция $u \in \text{dom}(\hat{H}_0^*)$ в случае двух связанных резонаторов (Ω_1 и Ω_2) представима как:

$$u(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} u_1^0(\mathbf{x}) + a_1^- G_{B1}(x, x_2, \lambda_0) + b_1^- \\ u_2^0(\mathbf{x}) + a_2^+ G_{B2}(x, x_2, \lambda_0) + b_2^+ \end{pmatrix},$$

где $u_i^0 \in \text{dom}(\hat{H}_0)$, $i = 1, 2$, а a_1^- , a_2^+ , b_1^- , b_2^+ – некоторые коэффициенты (где знаками «+» и «-» при i -ом коэффициенте мы различаем те, что находятся соответственно справа и слева от точки контакта, но относятся к одному резонатору). Для получения самосопряженного расширения $\widetilde{\hat{H}_0^*}$ необходимо установить зависимость между коэффициентами a_j^\pm , b_j^\pm . Рассмотрев граничную форму $(\hat{H}u, v) - (u, \hat{H}v)$ при наличии δ -потенциала интенсивности α в точках сочленения резонаторов, получаем следующее условие:

$$\begin{cases} a_j^+ = -a_{j-1}^-, \\ b_j^+ - b_{j-1}^- = \alpha a_{j-1}^-. \end{cases} \quad (1)$$

Так как элемент из области определения модельного оператора содержит функцию Грина, то для спектрального анализа системы необходим ее вид. Мы считаем, что функция Грина $G^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda)$ для оператора без поля известна [12]. Чтобы получить функцию Грина для задачи с полем, рассмотрим уравнение:

$$(\hat{H} - \lambda)f = g, \quad (2)$$

где g – известная функция, f – неизвестная. Причем будем искать решение в следующем виде: $f = (\hat{H}^0 - \lambda)^{-1}h$, где \hat{H}^0 – оператор в отсутствии внешнего поля. После подстановки

выражения для функции f в уравнение (2) и некоторых арифметических операций получаем интегральное уравнение Фредгольма II рода на функцию h :

$$h(r, \theta, \varphi) + \left(\frac{B^2}{4} r^2 \sin^2 \theta + iB \cos 2\varphi \right) \times \\ \times \iiint G^0(r, \theta, \varphi; r_1, \theta_1, \varphi_1; \lambda) h(r_1, \theta_1, \varphi_1) r_1^2 \sin \theta_1 dr_1 d\varphi_1 d\theta_1 \\ = g(r, \theta, \varphi). \quad (3)$$

Приняв во внимание вид неизвестной функции и выражение (3), находим функцию f :

$$f(\cdot) = \iiint \left\{ G^0(\cdot, \cdot, \cdot, \lambda) - \iiint G^0(\cdot, \cdot, \cdot, \lambda) R_B(\cdot, \cdot, \cdot, \lambda) r''^2 \sin \theta'' dr'' d\varphi'' d\theta'' \right\} \times \\ \times g(\cdot) r'^2 \sin \theta' dr' d\varphi' d\theta', \quad (4)$$

где $R_B(r'', \theta'', \varphi''; r', \theta', \varphi'; \lambda)$ – резольвента Фредгольма интегрального уравнения (3).

Таким образом, выражение, заключенное в фигурные скобки в формуле (4), и является искомой функцией Грина $G_B(r, \theta, \varphi; r', \theta', \varphi'; \lambda)$ для задачи с полем:

$$G_B(r, \theta, \varphi; r', \theta', \varphi'; \lambda) = G^0(r, \theta, \varphi; r', \theta', \varphi'; \lambda) - \\ = - \iiint G^0(r, \theta, \varphi; r', \theta', \varphi'; \lambda) R_B(r'', \theta'', \varphi''; r', \theta', \varphi'; \lambda) r''^2 \sin \theta'' dr'' d\varphi'' d\theta''. \quad (5)$$

Спектральный анализ системы

Проведем спектральный анализ системы, используя метод трансфер-матриц [13]. Так как изогнутая цепочка может быть получена из прямой сдвигом одной единственной точки сочленения резонаторов \mathbf{x}_0 , то подобная деформация не влияет на структуру непрерывного спектра [11]. Таким образом, можно найти непрерывный спектр рассматриваемой системы, обратившись к прямой цепочке и соответствующей матрице. Трансфер-матрица, выражающая в этом случае связь коэффициентов a_j^\pm с a_{j-1}^\pm , позволяет нам «транслировать» решение с одной ячейки цепочки на другую. Также отметим, что собственные числа трансфер-матрицы и асимптотическое поведение нормы вектора $\|(a_j^+, a_j^-)^T\|$ взаимосвязаны. Собственное число трансфер-матрицы, абсолютное значение которого меньше единицы, дает условие для определения принадлежности значения энергии к дискретному спектру, а равное по модулю единице позволяет найти непрерывный спектр.

В рамках модели волновая функция $\psi_j(\mathbf{x})$ в j -ом шаре, соответствующая спектральному параметру λ , имеет вид: $\psi_j(\mathbf{x}) = a_j^+ G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda) + a_j^- G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{j+1}, \lambda)$, а коэффициенты b_j^+, b_{j-1}^- выражаются следующим образом:

$$b_j^+ = a_j^+ \lim_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_j} (G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda) - G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda_0)) + a_j^- G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda), \quad (6)$$

$$b_{j-1}^- = a_{j-1}^+ G_B(\mathbf{x}_{j-1}, \mathbf{x}_j, \lambda) + a_{j-1}^- \lim_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_j} (G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda) - G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda_0)). \quad (7)$$

Подставив в систему (1) выражения (6), (7), получим следующую матричную связь коэффициентов:

$$\begin{pmatrix} a_j^+ \\ a_j^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ G_B(\mathbf{x}_{j-1}, \mathbf{x}_j, \lambda) & X \\ G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda) & G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{j-1}^+ \\ a_{j-1}^- \end{pmatrix} = \mathbf{M}_j \begin{pmatrix} a_{j-1}^+ \\ a_{j-1}^- \end{pmatrix},$$

где $X = -\alpha + 2g$, $g = \lim_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_j} (G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda) - G_B(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda_0))$, \mathbf{M}_j – искомая трансфер-матрица, собственное число которой имеет вид:

$$\mu_j^\pm = \frac{X}{2G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda)} \pm \sqrt{\left(G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda)\right)^2 - 1}, \quad (j \neq 0). \quad (8)$$

Сразу отметим, что у непрерывного спектра модельного Гамильтониана зонная структура. Более того, пока цепочка прямая и состоит из идентичных резонаторов, не может возникнуть значений, принадлежащих дискретному спектру оператора. Рассматриваемая в задаче деформация (однократный излом) может привести к появлению собственных значений оператора, относящихся к его дискретному спектру, и локализоваться они будут в районе деформации. Однократный излом цепочки можно понимать как «возмущение» точки \mathbf{x}_0 . Следовательно, для вывода уравнения на спектр необходимо рассмотреть участок цепи, содержащий шар номер 0 и его непосредственных соседей.

Взяв за основу условие (1), можно «связать» векторы $(a_{-1}^+, a_{-1}^-)^T$ и $(a_1^+, a_1^-)^T$. Далее так как собственные векторы трансфер-матрицы образуют базис рассматриваемого пространства, возьмем вектор $(a_{-1}^+, a_{-1}^-)^T$ с точностью до мультипликативной константы совпадающий с собственным вектором трансфер-матрицы (8) и используем условие линейной зависимости:

$$\begin{vmatrix} a_1^+ & a_{-1}^+ \\ a_1^- & a_{-1}^- \end{vmatrix} = -\frac{(\mu_{-1}^\pm)^2 + 1 - \mu_{-1}^\pm(X^2 + G_B^2 - Z_{\gamma,B})}{Z_{\gamma,B}G_B} = 0,$$

где $G_B = G_B(\mathbf{x}_{j-1}, \mathbf{x}_j, \lambda)$ при $j \neq 1$, $Z_{\gamma,B} = G_B(\mathbf{x}_0(\gamma), \mathbf{x}_1, \lambda)$. Вспомнив явный вид собственного числа (8) трансфер-матрицы, а также проделав ряд арифметических действий и аналитических рассуждений, это уравнение окончательно примет вид:

$$\frac{Z_{\gamma,B} - G_B^2}{Z_{\gamma,B}G_B} = 0. \quad (9)$$

Это основное уравнение для описания дискретного спектра. Следует помнить, что его решения должны удовлетворять условию на модуль собственного числа трансфер-матрицы, о котором говорилось ранее (явный вид этого условия легко получить, воспользовавшись выражением (8)).

Заключение

Проведя аналитический и численный анализ построенной модели, сформулируем теорему о спектре модельного гамильтониана:

Теорема. Спектр гамильтониана, описывающего поведение нерелятивистской бесспиновой частицы в однократно изогнутой цепочке слабо связанных шарообразных резонаторов при воздействии внешнего магнитного поля, состоит из собственных значений бесконечной кратности – собственных значений неймановского лапласиана в шаре, соответствующих собственным функциям, убывающим до 0 в обеих точках сочленения резонаторов (\mathbf{x}_{j-1} и \mathbf{x}_j), а также непрерывного спектра σ_C , имеющего зонную структуру и полностью описываемого неравенством: $|X/G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda)| \leq 2$ ($j \neq 0$).

Дискретный спектр σ_D исследуемого гамильтониана состоит из всех значений λ , удовлетворяющих уравнению (10) и условию: $|X/G_B(\mathbf{x}_{j+1}, \mathbf{x}_j, \lambda)| > 2$. Если $\gamma = 0$, то $\sigma_D = \{\}$; иначе (если $\gamma \in (0; \frac{2\pi}{3}]$) существуют такие значения параметров системы (α, B, λ_0) , что σ_D не пуст (в случае $B = 0$ при помощи асимптотических разложений может быть получено аналитическое выражение для отрицательного собственного значения из дискретного спектра).

Для экономии вычислительных мощностей в данной работе предлагается использовать метод конечных элементов для поиска необходимых значений функций Грина вместо прямого вычисления с помощью формулы (5). В ходе численного моделирования задачи было установлено, что наведение внешнего магнитного поля «сгущает» зоны непрерывного спектра, а от интенсивности взаимодействия резонаторов зависит ширина спектральной зоны, причем на ее позицию на энергетической оси это не влияет (от α зависит только верхняя граница спектральной зоны).

Построенная математическая модель имеет несколько варьируемых величин, что позволяет контролировать спектральные характеристики соответствующих реальных систем, манипулируя ее геометрическими и (или) физическими параметрами. Например, мы имеем возможность контролировать расположение зон и лагун спектра реальной физической системы, воздействуя на нее полем; изменять ширину зоны непрерывного спектра, подбирая необходимую интенсивность взаимодействия; двигать по оси энергий значение из дискретного спектра, воздействуя на угол излома цепочки. Таким образом, несмотря на теоретический характер, работа может быть использована для построения реальной физической системы с определенными свойствами. В дальнейшем полученную модель можно модифицировать, усложнив геометрию цепочки, добавив разветвление или малый цикл, что позволит конструировать все более нетривиальные реальные физические системы.

Публикации

1. Аникевич А.С. Спектральная задача для цепочек слабо связанных шарообразных резонаторов // Наносистемы: физика, химия, математика. СПб., 2012. Т. 3. № 3. С. 23–30.
2. Melikhova A.S., Popov I.Y. Bent and branched chains of nanoresonators // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 541. P. 012061.
3. Melikhova A.S. Spectral bands for chain of ball resonators with Dirichlet condition // Days on Diffraction 2014: International Conference. Abstracts. St. Petersburg, 2014. P. 65–66.
4. Melikhova A.S., Popov I.Y. Bent and branched chains of nanoresonators // 1st International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint-Petersburg OPEN 2014”. Book of Abstracts. St. Petersburg, 2014. P. 243.
5. Melikhova A.S. Estimates for numbers of negative eigenvalues of Laplacian for Y-type weakly coupled chain of ball resonators // Mathematical Results in Quantum Mechanics: Proceedings of the QMath12 Conference. Berlin, 2014. P. 325–330.
6. Мелихова А.С. Математическая модель цепочки нанорезонаторов с однократным изломом: случай δ - и δ' -соединения [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1420/1420.pdf> (дата обращения: 15.10.2017).
7. Melikhova A.S. Zigzag chain model and its spectrum // Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems. Conference in memory of Boris Pavlov: Book of Abstracts of the International Conference. St. Petersburg, 2016. P. 14.
8. Blinova I.V., Melikhova A.S., Popov I.Y. Periodic chain of resonators: gap control and geometry of the system // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. P. 012062.
9. Melikhova A.S., Popov I.Y. Spectral problem for solvable model of bent nano peapod // Applicable Analysis. 2017. Vol. 96. No 2. P. 215–224.

Литература

1. Wang C. et al. Electrochromic nanocrystal quantum dots // Science. 2001. Vol. 291. No 5512. P. 2390–2392.
2. Rech J., Matveev K.A. Electronic transport in inhomogeneous quantum wires // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20. No 16. P. 164211.
3. Warner J.H. et al. Graphen: fundamentals and emergent applications. New York, 2012. – 366 p.

4. Dresselhaus M.S. et al. Carbon nanotubes: synthesis, structure, properties, and applications. Berlin, 2001. – 448 p.
5. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 9. С. 977–1009.
6. Yang Y. et al. Plasmon absorption of Au-in-CoAl₂O₄ linear nanopore chains // The Journal of Physical Chemistry C. 2013. Vol. 117. No 27. P. 14142–14148.
7. Enyashin A.N., Ivanovskii A.L. Nanotubular composites: modeling of capillary filling of nanotubes of disulfide of molybdenum by molecules of TiCl₄ // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2010. Vol. 1. No 1. P. 63–71.
8. Popov I.Y. The resonator with narrow slit and the model based on the operator extensions theory // Journal of Mathematical Physics. 1992. Vol. 33. No 11. P. 3794–3801.
9. Pavlov B.S. Extension theory and explicitly solvable models // Uspekhi Matematicheskikh Nauk. 1987. Vol. 42. No 6. P. 99–131.
10. Geyler V.A. et al. Spectral properties of a charged particle in antidot array: a limiting case of quantum billiard // Journal of Mathematical Physics. 1996. Vol. 37. No 10. P. 5171–5194.
11. Бурман М.Ш., Соломяк М.З. Спектральная теория самосопряженных операторов в гильбертовом пространстве. СПб., 2010. – 464 с.
12. Melikhova A.S., Popov I.Y. Spectral problem for solvable model of bent nano peapod // Applicable Analysis. 2017. Vol. 96. No 2. P. 215–224.
13. Duclos P. et al. On the spectrum of a bent chain graph // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 2008. Vol. 41. No 41. P. 415206.



Миллюшин Александр Сергеевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: miljushin@rambler.ru

АДАПТИВНОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ НЕИЗВЕСТНЫХ МУЛЬТИСИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО ВХОДАМ

А.С. Миллюшин

Научный руководитель – доцент Д.Н. Герасимов

Цель работы – синтез алгоритма воспроизведения мультисинусоидального сигнала в ММО-системах (*multiple input multiple output* – многоканальные системы) с запаздываниями по входу. Имеющиеся в настоящее время варианты синтеза основаны на идентификации неизвестного сигнала [1–4]. В данной работе предлагается использовать принципы прямого адаптивного управления, базирующиеся на методах внутренней модели и расширенной ошибки.

Объект управления зададим в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BK_p u_d, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (1)$$

где x – вектор состояния объекта, y – вектор выхода, A – матрица состояния объекта, B – матрица управления объекта, C – матрица выхода, u_d – вектор управления, представленный в следующем виде: $u_d = \text{col}(u(t - \tau_i))$, $i=1, 2, \dots, q$, K_p – высокочастотная матрица (результаты исследования без ее учета могут быть легко экстраполированы на случаи с ее наличием).

Приняты следующие допущения.

Допущение 1: матрицы A , B и C известны, причем матрица A – гурвицева.

Допущение 2: объект является минимально фазовым, причем передаточная матрица $W(s) = C(Is - A)^{-1}B$ имеет полный ранг.

Допущение 3: K_p неизвестно, но при этом $K_p \Gamma^T = \Gamma K_p^T \succ 0$ [4].

Цель проекта: построить такой алгоритм управления, при котором все сигналы внутри системы были бы ограничены и соблюдалось бы следующее равенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|g - y\| = 0, \quad (2)$$

где $g \in L_\infty$ – вектор мультисинусоидальных сигналов с неизвестными амплитудами, частотами и фазами гармоник. Вектор g может быть представлен как выход экзосистемы в соответствии с принципом внутренней модели:

$$\begin{cases} \dot{z} = \Lambda z, \\ g = Hz, \end{cases} \quad (3)$$

где $z \in \mathbb{R}^m$ – вектор состояния внутренней модели, $\Lambda \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – матрица, элементы которой являются константами и которая имеет простые собственные значения, расположенные на мнимой оси. $H \in \mathbb{R}^{q \times m}$ – матрица выхода экзосистемы. Параметры Λ и H неизвестны.

Решение поставленной задачи осуществляется в нескольких шагов, первым из которых является параметризация сигнала эталонной модели. Решим сначала задачу для одинакового запаздывания во всех каналах. Для этого сигнал выхода представляется с помощью модели линейной регрессии:

$$g = \Theta \xi + \zeta, \quad (4)$$

где $\Theta \in \mathbb{R}^{q \times m}$ – матрица с неизвестными параметрами, $G \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – произвольная известная гурвицева матрица, $L \in \mathbb{R}^{m \times q}$ – известная постоянная матрица, выбранная таким образом, чтобы пара (G, L) была управляемой, ζ – вектор экспоненциально затухающих значений, вызванный наличием первоначальных ненулевых условий, ξ – измеряемый вектор, генерируемый следующим фильтром:

$$\dot{\xi} = G\xi + Lg. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) и опуская вектор ζ , что обосновано в целом ряде работ, например [1], получаем:

$$\dot{\xi} = (G + L\Theta)\xi, \quad \xi(0). \quad (6)$$

Таким образом, осуществлен переход в новый базис, что сделало возможным заменить не измеряемый вектор g измеряемым ξ . Фундаментальное решение (6) вместе с использованием известной формулы Арштейна [5] представлено следующим выражением:

$$\xi(t) = e^{(G+L\Theta)t} \xi(0). \quad (7)$$

Это позволяет представить вектор g в новой форме параметризации:

$$g = \Theta e^{(G+L\Theta)\tau} \xi(t - \tau) \quad (8)$$

Легко заметить, что $\Theta e^{(G+L\Theta)\tau}$ – новый вектор неизвестных параметров.

Следующим шагом является синтез закона управления. Для этого введем ошибку по выходу вида: $\varepsilon = g - y$. Осуществим замену второго слагаемого на модель объекта управления с передаточной функцией:

$$\varepsilon = g - y = g - W(s)[u(t - \tau)]$$

Если вынести передаточную матрицу за скобки и воспользоваться принципом непосредственной компенсации, получим:

$$u = \hat{\Psi} \xi, \quad (9)$$

где $\hat{\Psi}$ – матрица регулируемых параметров.

Подставим управление в модель ошибки, тогда:

$$\varepsilon = W(s) [\tilde{\Psi}(t - \tau) \xi(t - \tau)], \quad (10)$$

где $\tilde{\Psi} = \Psi - \hat{\Psi}$ матрица параметрических ошибок размерности $q \times m$.

В соответствии с традиционным подходом осуществляется прямая подстановка полученного управления, однако в нашем случае присутствует запаздывание, что может сделать систему с таким управлением неустойчивой при определенных условиях [6].

Для того чтобы получить алгоритм адаптации без запаздывания, используем модель расширенной ошибки. После преобразований алгоритм в матричной форме имеет вид:

$$\dot{\hat{\Psi}} = \begin{bmatrix} \tilde{\varepsilon}^T \begin{bmatrix} W_{11}(s) [\xi^T(t - \tau_1)] \\ \vdots \\ W_{q1}(s) [\xi^T(t - \tau_q)] \end{bmatrix} \Gamma_1 \\ \tilde{\varepsilon}^T \begin{bmatrix} W_{12}(s) [\xi^T(t - \tau_1)] \\ \vdots \\ W_{q2}(s) [\xi^T(t - \tau_q)] \end{bmatrix} \Gamma_2 \\ \vdots \\ \tilde{\varepsilon}^T \begin{bmatrix} W_{1m}(s) [\xi^T(t - \tau_1)] \\ \vdots \\ W_{qm}(s) [\xi^T(t - \tau_q)] \end{bmatrix} \Gamma_m \end{bmatrix}, \hat{\Psi}(0) \quad (11)$$

Сходимость параметров системы к требуемым значениям может занимать длительное время, поэтому целесообразно применить методы ускоренной сходимости, которые существенно сокращают время, необходимое для достижения условия (2).

В настоящей работе предполагается использование двух подходов, первый из них базируется на использовании градиента (градиентный подход [6]), второй основан на применении линейного оператора с памятью, примером которого является оператор вида:

$$\frac{1}{s + \mu}, \text{ где } \mu - \text{ фактор списывания (константа). Вопрос ускоренной сходимости подробно}$$

рассмотрен в специальной литературе [6], поэтому останавливаться на нем в этой статье представляется нецелесообразным.

Проверка полученных результатов осуществлена в среде имитационного моделирования *Simulink*. Для этого был взят объект управления вида:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 7 & 8 \\ 9 & 10 \end{bmatrix}.$$

Остальные параметры модели выбраны следующим образом:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}.$$

Для нахождения передаточной матрицы воспользуемся формулой: $W(s) = C(Is - A)^{-1}B$, в результате чего получим:

$$W_{11}(s) = \frac{31s + 8}{s^2 + 5s + 6}, \quad W_{12}(s) = \frac{46s + 2}{s^2 + 5s + 6},$$

$$W_{21}(s) = \frac{39s + 12}{s^2 + 5s + 6}, \quad W_{22}(s) = \frac{58s + 6}{s^2 + 5s + 6}.$$

Мультисинусоидальный сигнал представлен выражениями:

$$g_1(t) = \sin(t),$$

$$g_2(t) = 2\sin(t + 6).$$

На рис. 1 проиллюстрированы результаты моделирования для $\tau = 10$ с.

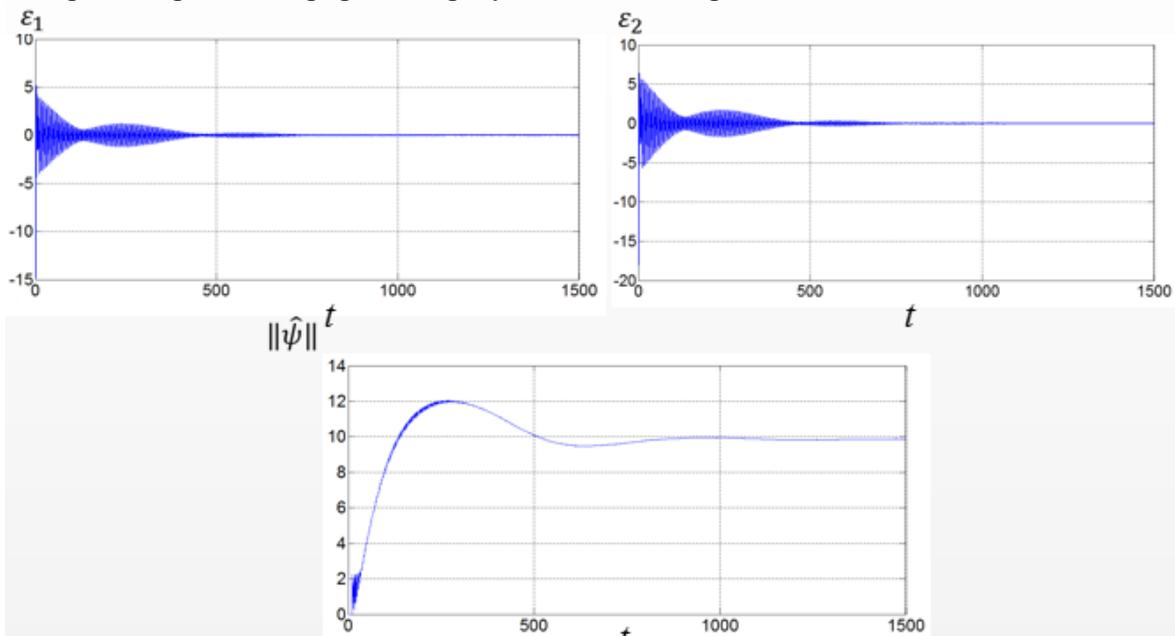


Рис. 1. Результаты моделирования двухканальной системы с одинаковым запаздыванием в каналах 10 с

Как видно из графиков, ошибка ε сходится к нулю менее чем за 1000 с, а норма матрицы настраиваемых параметров $\|\hat{\psi}\|$ ограничена, что подтверждает ограниченность внутренних сигналов.

Для случая с различными временными задержками в каналах выбран тот же объект управления с $\tau_1 = 1$ с, $\tau_2 = 100$ с (рис. 2). В данном случае также имеет место сходжение ошибки к нулю и ограниченность внутренних сигналов.

Далее были применены методы ускоренной сходимости. На рис. 3 представлены результаты для метода градиентов (условия те же, что и в предыдущем эксперименте).

На рис. 4 приведены результаты моделирования при использовании линейного оператора. В этом случае видно, что синтезированные алгоритмы ускоренной сходимости дают значительное сокращение времени, требуемого для достижения поставленной цели.

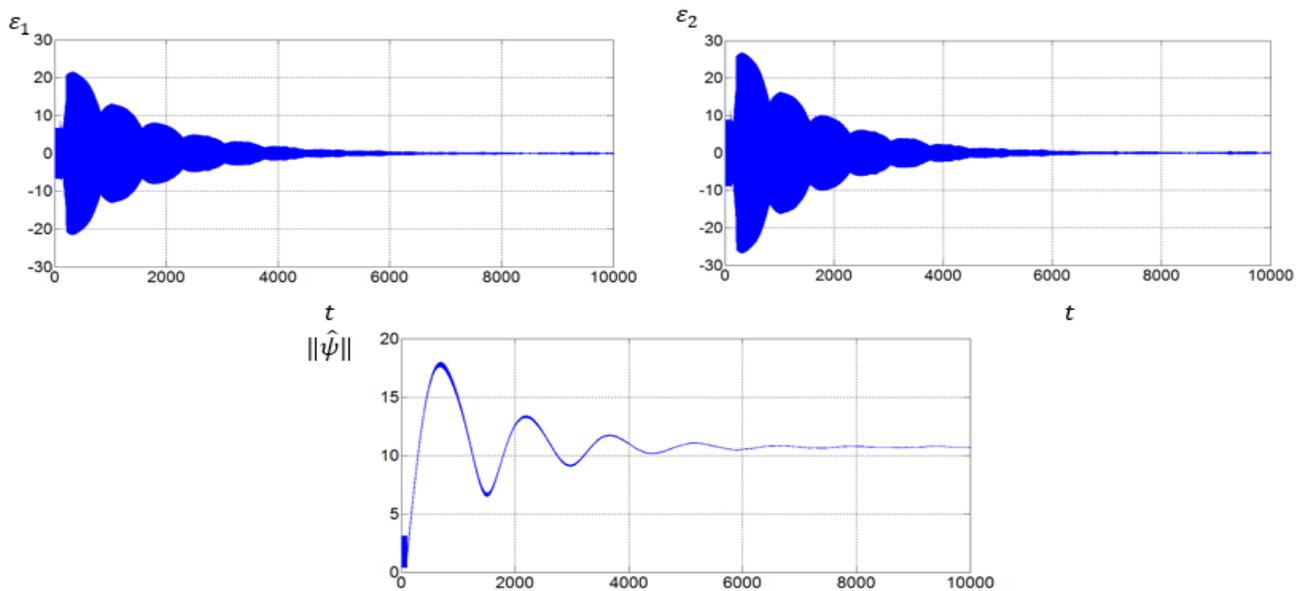


Рис. 2. Результаты моделирования в двухканальной системе с запаздываниями 1 с для первого и 100 с для второго каналов управления

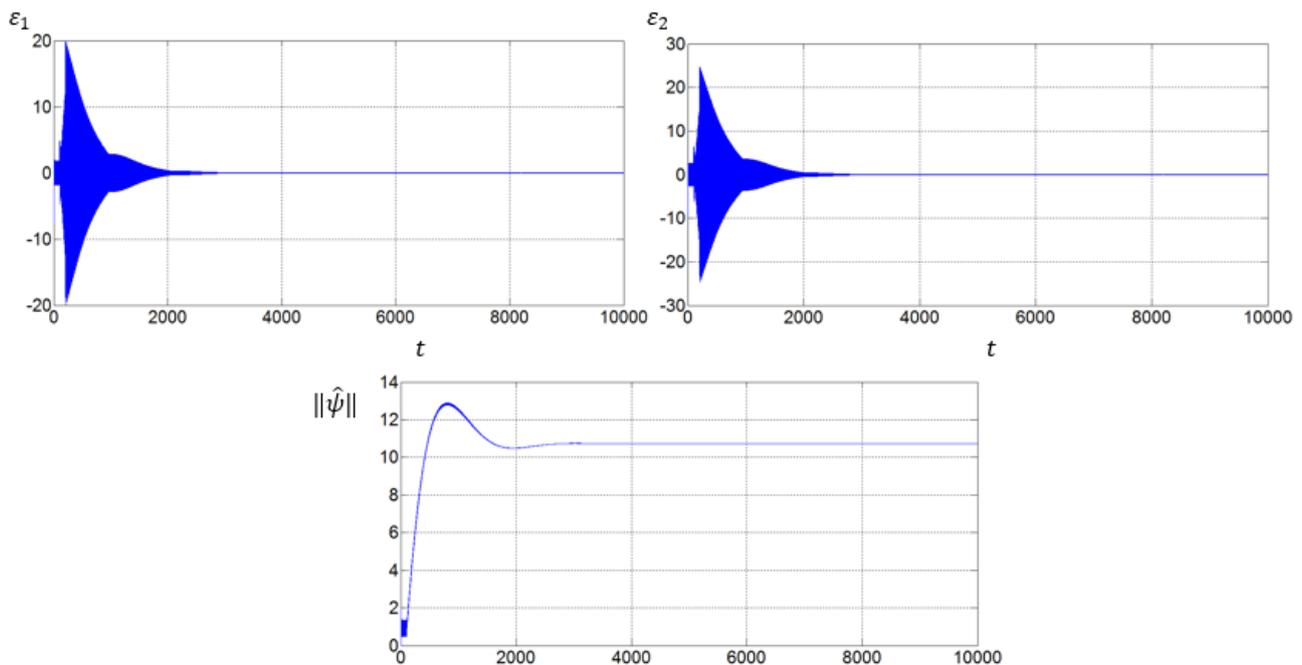


Рис. 3. Моделирование с применением алгоритма ускоренной сходимости (градиента) с запаздываниями 1 с для первого и 100 с для второго каналов управления

Заключение

В проекте разработан алгоритм для адаптивного воспроизведения неизвестных мультисинусоидальных сигналов в многоканальных системах с запаздываниями по входам.

В ходе теоретического исследования была проведена параметризация неизвестного мультисинусоидального сигнала, построена расширенная модель ошибки и синтезирован алгоритм управления. Было предложено две его модификации, позволяющие повысить сходимость параметров исследуемых систем.

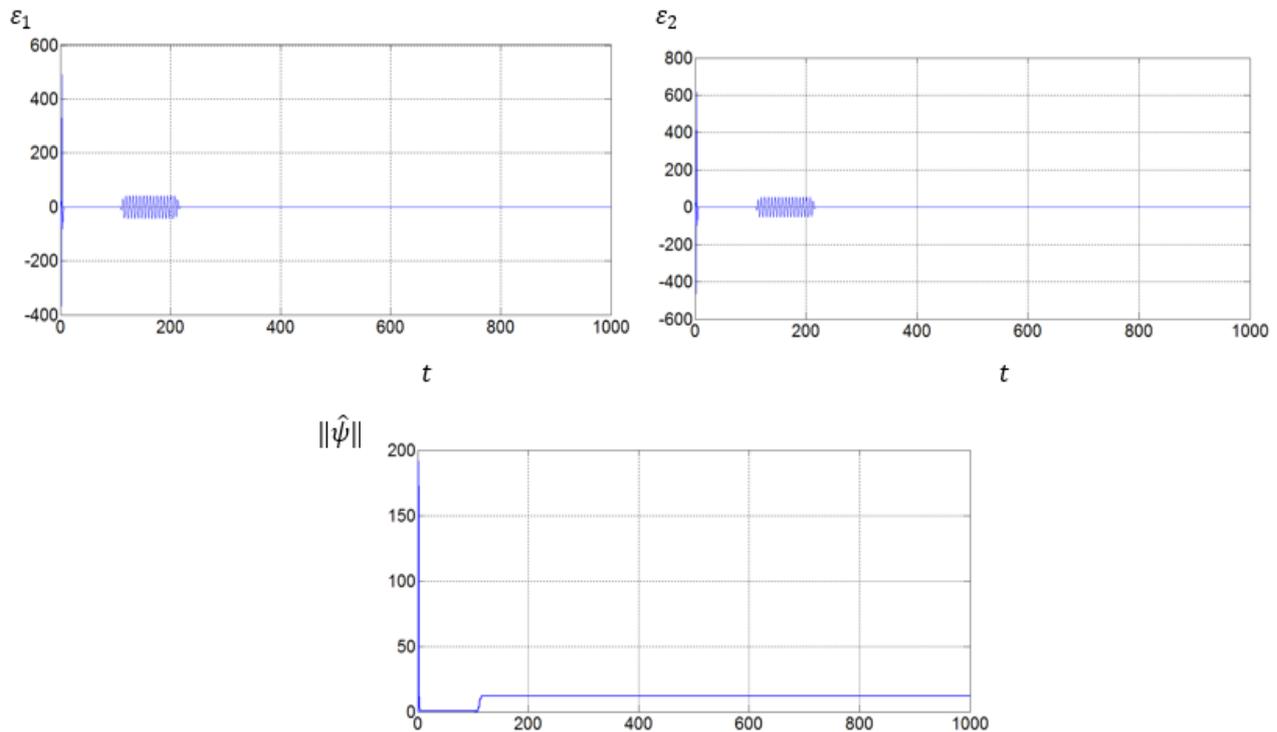


Рис. 4. Моделирование с применением алгоритма ускоренной сходимости (линейного оператора) с запаздываниями 1 с для первого и 100 с для второго каналов управления

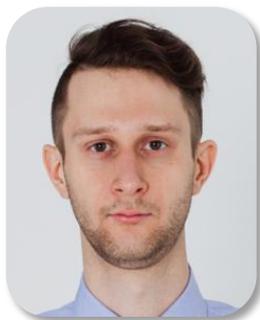
Полученный результат может быть использован для дальнейших теоретических исследований в области адаптивного управления *ММО*-системами, а также на практике, что было показано во введении к данной работе.

Публикации

Miliushin A.S. Adaptive tracking of multisinusoidal signal in linear MIMO systems with input delay // International Workshop Navigation and Motion Control (NMC 2017). Collection of Abstracts. St. Petersburg, 2017. P. 12.

Литература

1. *Gromov V.S. et al.* Adaptive multisinusoidal signal tracking system with input delay // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. No 13. P. 105–110.
2. *Pyrkin A.A. et al.* Compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with delay in control // 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems. Vol. 43. No 14. P. 481–486.
3. *Pyrkin A.A. et al.* Simple output controller for nonlinear systems with multisinusoidal disturbance // 21st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Chania, 2013. P. 1087–1091.
4. *Pyrkin A.A. et al.* Output adaptive controller for linear system with input delay and multisinusoidal disturbance // IEEE Conference on Control Applications (CCA). Antibes, France. P. 1777–1782.
5. *Arstein Z.* Linear systems with delayed controls: a reduction // IEEE Transactions on Automatic Control. 1982. Vol. 27. No 4. P. 869–879.
6. *Narendra K.S., Annaswamy A.M.* Stable adaptive systems. New York, 2005. – 496 p.



Нуждин Кирилл Андреевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра мехатроники
E-mail: nkirill74@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

К.А. Нуждин

Научный руководитель – профессор В.М. Мусалимов

Цель выполнения проекта – разработка метода, позволяющего в режиме реального времени производить мониторинг качественных и количественных изменений (износа) поверхностей трения деталей машин и механизмов без разрыва контакта сопряженных пар трения и без прерывания процесса функционирования механизма. Данный метод основан на определении динамических параметров, характеризующих процесс взаимодействия образцов трибологической пары.

Дополнительной (но не менее важной) задачей исследования является формирование новой эволюционной теории трения, которая наряду с уже существующими включает компоненты макроскопической силы трения, влияющей на весь процесс фрикционного взаимодействия. Эти компоненты связаны с потерей устойчивости отдельных микроконтактов (в данном случае каждый выступ шероховатости поверхности образца трения рассматривается как упругий элемент) поверхности пары трения, а также процессы, связанные с возникновением различных физических явлений, например, таких как трибоэлектродвижущая и термоэлектродвижущая силы.

В рамках проекта рассматривались задачи внешней динамики трения, под которыми понимаются исследования динамических характеристик трибологических объектов. Система такого вида, с точки зрения теории автоматического управления, является объектом параметрической идентификации в простейшем случае с такими параметрами, как коэффициент демпфирования n и частота собственных колебаний ω . Под идентификацией понимается построение математических моделей того или иного типа на основе результатов наблюдений за поведением объектов и исследования их свойств [1].

Приведенный выше подход дает возможность использовать амплитудно-частотные характеристики для оценивания динамических коэффициентов фрикционного взаимодействия, исследования процессов эволюции триботехнических характеристик и анализа демпфирующих и колебательных свойств трибологической системы. Он реализуется с помощью экспериментального комплекса «Трибал-Т», на котором устанавливаются исследуемые образцы, находящиеся в режиме взаимного перемещения *slip-step*. Комплекс был спроектирован и собран на базе кафедры мехатроники Университета ИТМО. Внешний вид установки и основные ее элементы показаны на рис. 1 [2, 3].

Используемая для анализа модель «вход – выход» применяется для решения прикладных задач аппарата теории автоматического управления, теории катастроф. При идентификации процессов трения использование уравнений с различными степенями свободы позволяет моделировать разнообразные движения трибопар и структуру фрикционных слоев.

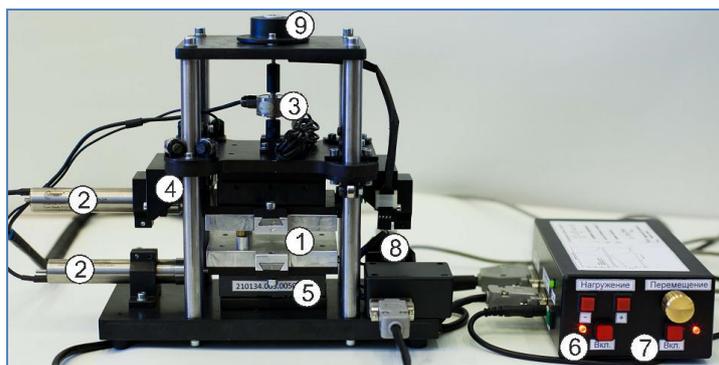


Рис. 1. Экспериментальный трибологический комплекс «Трибал-Т»:
 1 – держатели верхнего и нижнего образцов; 2 – датчики линейных перемещений;
 3, 4 – датчики нормальной и тангенциальной нагрузки соответственно;
 5 – направляющие линейных перемещений; 6 – блок управления приводом нагружения;
 7 – контроль привода возвратно-поступательного движения; 8 – привод циклического
 возвратно-поступательного движения; 9 – привод нагружения

Динамическая система задается в виде «вход – состояние – выход»:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (3)$$

где x – вектор состояний, u – входные данные, y – выходные, A – матрица коэффициентов пространства состояний; B – вектор коэффициентов управления (вход u); C – вектор коэффициентов наблюдателя (выход y):

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2n \end{pmatrix}; B = (0,1)^T; C = (1,0). \quad (4)$$

Используя полученную модель, можно идентифицировать (определить) динамические характеристики трибологического сопряжения (в нашем случае – частоту собственных колебаний, коэффициент демпфирования и динамический коэффициент трения).

Было исследовано шесть пар трения, состоящих из материалов с разной структурой: сталь марки ХВГ – сталь марки ХВГ, алюминий – алюминий, сталь марки ХВГ – оптическое стекло, оптическое стекло – сталь марки ХВГ, сталь марки ХВГ – алюминий, алюминий – сталь марки ХВГ. На начальном этапе были сняты профилограммы данных образцов.

Далее для исследования динамических характеристик трибологических объектов проводились серии экспериментов, в ходе которых были получены данные, характеризующие абсолютные перемещения нижнего (входной сигнал) и верхнего (выходной сигнал) образцов. Затем с помощью пакета прикладных программ *MatLab* в пространстве состояний были получены дискретная модель и передаточная функция, которые отображают поведение динамической системы. Использование вектора коэффициентов в пространстве состояний дает возможность непосредственно определить коэффициент демпфирования и частоту собственных колебаний моделируемой системы (4).

Для наглядного графического определения отношений амплитуд входного и выходного сигналов, получаемых при циклическом перемещении соответственно нижнего и верхнего образцов трибологической пары, были построены диаграммы Боде (логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика). Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2.

Построенные для разных трибологических пар диаграммы позволяют наглядно увидеть изменения динамических параметров фрикционной системы: уменьшение максимального значения пиковой точки (отношение выходного сигнала к входному) амплитудно-частотной

зависимости и увеличение области граничных значений фазы фазово-частотной зависимости (что характеризует снижение частоты собственных колебаний фрикционной пары).

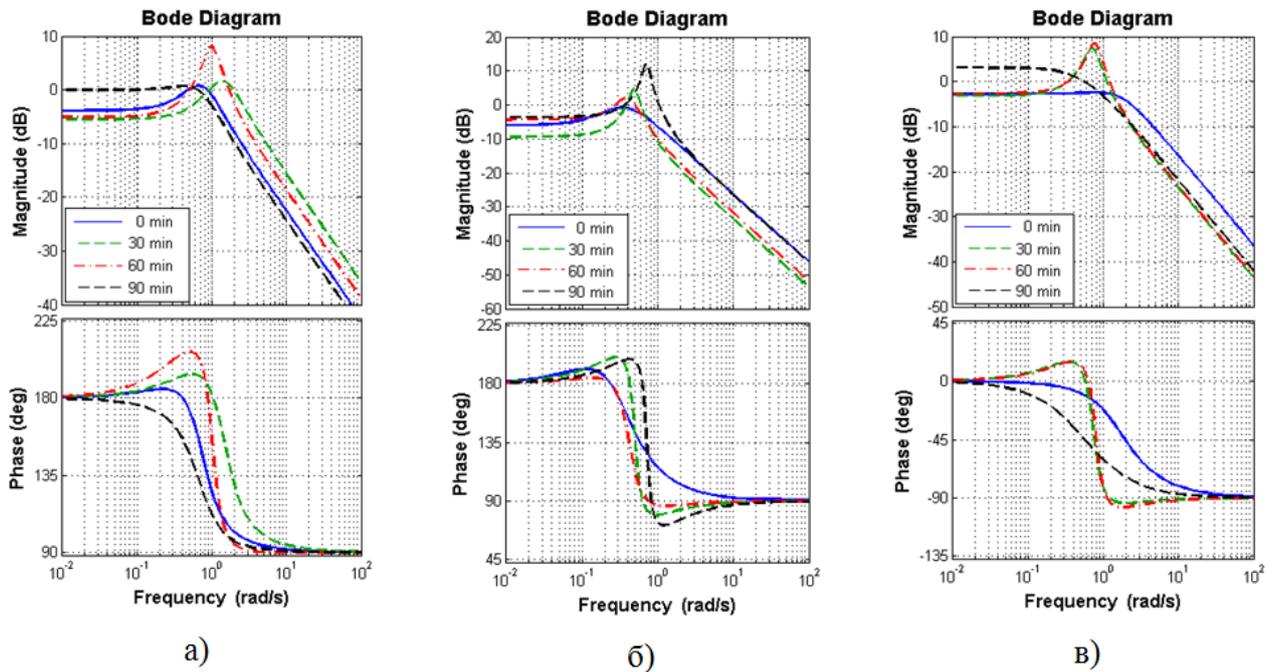


Рис. 2. Диаграммы Бode в различные моменты времени с шагом 30 минут:
 а – сталь марки ХВГ – сталь марки ХВГ; б – алюминий – алюминий;
 в – сталь марки ХВГ – оптическое стекло

Используя полученный график амплитудно-частотной характеристики в логарифмическом масштабе, можно вычислить отношение выходного сигнала к входному, что и будет являться коэффициентом трения:

$$A_m = 20 \cdot \lg \left(\frac{A_{\text{ВЫХОД}}}{A_{\text{ВХОД}}} \right), \quad (5)$$

где A_m – значение амплитуды графика логарифмической амплитудно-частотной характеристики.

Отсюда можно получить выражение для определения динамического коэффициента трения:

$$k_d = \frac{A_{\text{ВЫХОД}}}{A_{\text{ВХОД}}} = 10^{\frac{A_m}{20}} \quad (6)$$

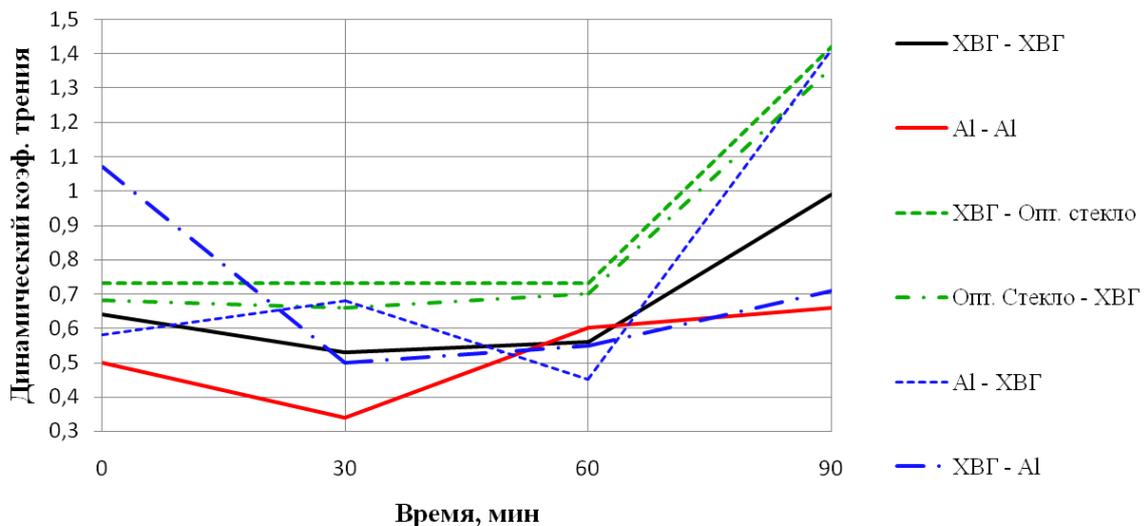


Рис. 3. Графики изменения коэффициента трения для различных фрикционных узлов

На рис. 3 представлены значения коэффициента трения, полученные в процессе эксперимента.

На следующем этапе работы был проведен качественный анализ процесса трения, связанного с потерей устойчивости отдельных элементов микроконтактов [4].

При оценочном моделировании процесса скольжения с трением можно принять единичный пик шероховатости поверхности (выступ) образца трибологической пары за упругий стержень, заделанный одним концом. Свободный его конец находится под влиянием силы давления, направленной вдоль продольной оси стержня. Длина стержня R принимается за среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля шероховатости в пределах базовой длины R_a . Таким образом, под воздействием силы нагружения P можно наблюдать деформацию поверхностного слоя, проявляющуюся в изменении формы выступов (стержня).

Сжатие прямого упругого стержня понижает его собственную частоту до тех пор, пока она наконец не станет равной нулю. Это происходит при значении нагрузки, равной критической $P_{кр}$. Действительно анализ линейных колебаний, в котором сохраняются только квадратичные члены энергии, показывает, что корень из основной собственной частоты для первой гармоники имеет вид:

$$W = Q \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot R}\right), \quad (7)$$

где Q – амплитуда изгибной моды, x – расстояние от закрепленного основания стержня. Он уменьшается до нуля по линейному закону при увеличении нагрузки до Эйлеровой нагрузки потери устойчивости:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{4 \cdot R^2}. \quad (8)$$

Здесь $E \cdot J$ – изгибная жесткость, которая представляет собой произведение модуля Юнга материала E на момент инерции поперечного сечения J .

Таким образом, используя приведенные выше закономерности, можно получить выражение, позволяющее определить коэффициент трения с потерей устойчивости отдельных элементов микроконтакта:

$$f = \frac{P_{тр}}{P_{кр}} = \frac{\frac{3 \cdot E \cdot J \cdot \Delta}{R^3}}{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{4 \cdot R^2}} = \frac{3 \cdot 4 \cdot R^2 \cdot E \cdot J \cdot \sqrt{\frac{8}{3 \cdot P} \cdot \frac{(P - P_{кр}) \cdot (2 \cdot R)^2}{\pi^2}}}{R^3 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot J} = \frac{24 \cdot \sqrt{\frac{8}{3}} \cdot \sqrt{1 - \frac{P_{кр}}{P}}}{\pi^3}. \quad (9)$$

Однако можно заметить, что полученный коэффициент трения будет увеличивать свое значение с ростом силы нагружения до тех пор, пока воздействие поперечной изгибающей силы не превысит предел прочности рассматриваемого элемента микроконтакта (стержня).

Также были исследованы особенности возникновения электродвижущей силы и изучено влияние электрических явлений на трибологические характеристики фрикционного сопряжения.

При трении двух тел всегда электризуются оба тела. Электризация тем больше, чем больше поверхность контакта [5]. В процессе исследований трибологических явлений при технически сухом трении металлов в возвратно-поступательном движении отмечено образование и накопление значительных электрических потенциалов (рис. 4).

Введение диэлектрика (масла) между двумя взаимно перемещающимися проводниками приводит к образованию своего рода конденсатора, в котором могут накапливаться электрические заряды. С учетом того, что при трении в присутствии смазочного материала пленка смазки может разрываться на микронеровностях, возможно появление электрических явлений, аналогичных тем, что возникают при сухом трении: эмиссии электронов, термоэлектрических явлений, контактной разности потенциалов и т. д. [6].

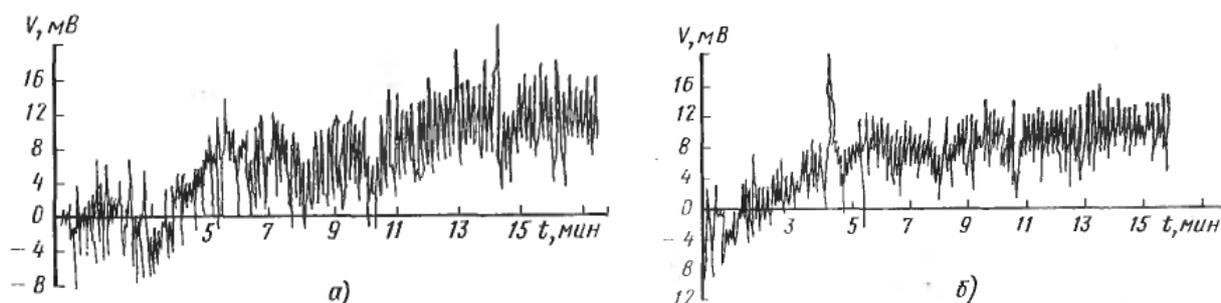


Рис. 4. Разность потенциалов, возникающая в процессе технического сухого трения:
 а – при нормальной нагрузке равной 66 Н; б – при нормальной нагрузке равной 96 Н

В работе М.Т. Балабекова [5] экспериментально установлена закономерность в последовательности преобразования энергии, заключающаяся в том, что работа сил трения в первом акте взаимодействия расходуется на образование электромагнитного поля и только затем находит свое тепловое выражение. Полученные результаты показывают, что увеличение контактного давления приводит к снижению трибо-ЭДС. Также установлено, что трибо-ЭДС уменьшается при увеличении температуры.

Заключение.

В рамках данной работы были достигнуты следующие результаты.

1. Проведены патентный и литературный обзоры: теорий трения и основных компонентов, влияющих на процесс фрикционного взаимодействия; методов исследования и измерения термических и электромагнитных явлений (таких как термо- и трибо-ЭДС), возникающих при фрикционных взаимодействиях.

2. Исследованы особенности возникновения электродвижущей силы для трибопар, взаимодействующих при различных условиях и схемах сопряжения. Изучены влияния электрических явлений на трибологические характеристики фрикционного сопряжения.

3. Проведены исследования по изучению поверхностной структуры образцов трибологических пар и процессов идентификации характеристик внешней динамики фрикционного взаимодействия на основе экспериментальных данных, полученных с помощью установки для трибологических исследований «Трибал-Т».

4. Разработан способ оценки меры шероховатости поверхностей с помощью упругого элемента, в качестве которого предполагается использование упругого стержня квадратного сечения, жестко заделанного одним концом. Предложенный метод позволяет в режиме реального времени определять закономерности между динамическими характеристиками трибологического сопряжения (например, частотой собственных колебаний) и внешними структурными параметрами (длиной упругого элемента). Благодаря этому появляется возможность определения количественного значения коэффициента трения.

Результаты проекта могут быть использованы в учебном процессе, а также применены в областях изучения фрикционных взаимодействий и их моделирования.

Публикации

1. Nuzhdin K., Musalimov V.M., Sivitski A. Application of memristor in simulation of friction processes // Proceedings of 10th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering. – 2015. URL: http://innomet.ttu.ee/daaam15/Proceedings/DAAAM_2015_Book.pdf (Дата обращения: 05.11.2017).

2. Нуждин К.А., Мусалимов В.М. Проблемы при моделировании процесса трения с учетом действия электрических явлений // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, 2016.

3. *Nuzhdin K.* Investigation of electrical phenomena occurring in friction processes // Proceedings of 11th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering. – 2016. – pp. 181–184. URL: <http://innomet.ttu.ee/daaam/proceedings/Book2016.pdf> (Дата обращения: 05.11.2017).
4. *Перепелкина С.Ю., Коваленко П.П., Печенко Р.В., Нуждин К.А.* Методика исследования трибологических характеристик материалов на машине трения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 8. – С. 636–640.
5. *Нуждин К.А., Мусалимов В.М.* Идентификация частотного параметра фрикционного взаимодействия // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, 2017.
6. *Nuzhdin K., Musalimov V.M., Tyurin A.* Modelling of external dynamic of the friction engagement // 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. Book of papers. – 2016. – P. 1802–1803
7. *Musalimov V.M., Nuzhdin K.* Influence of Roughness Parameters on Dynamics of a Friction Interaction // Proceedings of the 16th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Doctoral School of Energy and Geotechnology. – 2017. – P. 189–192.
8. Патент РФ № 172799 от 24.07.2017. Исполнительное устройство на основе упругого элемента // *Мусалимов В.М., Нуждин К.А.*
9. *Мусалимов В.М., Каланышина И.И., Нуждин К.А.* Идентификация динамических систем фрикционного взаимодействия (MatLab): учебное пособие для высших учебных заведений. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 143 с.
10. *Nuzhdin K., Musalimov V.M.* The experimental determination of bifurcation components of friction // Procedia Engineering, IET – 2017, Vol. 199, pp. 1478–1483.

Литература

1. *Дилигенская А.Н.* Идентификация объектов управления. Учебное пособие. Самара: ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», 2009 – 136 с.
2. Патент РФ № 2244290 от 20.01.2016. Устройство для исследования триботехнических характеристик материалов // *Мусалимов В.М., Исмаилов Г.М., Тюрин А.Е., Власов Ю.А., Метелица В.А.*
3. *Мусалимов В.М., Сизова А.А., Иванов Е.К., Крылов Н.А., Ткачёв А.Л.* Основы трибоники. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 77 с.
4. *Мусалимов В.М.* Бифуркационная составляющая трения скольжения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2017. Т.60, №7. – с. 10–17.
5. *Балабеков М.Т., Джаббанов Р.* Статистические электрические явления при трении металлов // Теория трения, износа и смазки. Ч. 3. Ташкент, 1975. – 121 с.
6. *Машков Ю.К., Блесман А.И.* Динамика процесса трения металлополимерных трибосистем // Долговечность трущихся деталей машин. Машиностроение, 1990. – Вып.4. – с. 244–253.



Петрова Ирина Анатольевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: irenepetrova@yandex.com

АДАПТИВНАЯ НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОМОЩЬЮ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

И.А. Петрова

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Введение

Эволюционные алгоритмы (ЭА) [1, 2] применяются для решения задач оптимизации, для которых неприменимы точные алгоритмы. К ним относятся *NP*-полные задачи, например задача коммивояжера и задача составления расписаний. ЭА основаны на идеях, заимствованных из биологической эволюции: естественный отбор, мутация, скрещивания и наследование признаков. Каждая итерация алгоритма характеризуется набором особей, называемым поколением. На множестве особей вводят функции приспособленности (ФП), которые количественно оценивают, насколько заданная особь близка к верному решению. При помощи оператора скрещивания по двум особям генерируется особь для следующего поколения. Оператор мутации вносит малые случайные изменения особи. Начальное поколение обычно формируется некоторым случайным образом.

Эффективность ЭА оценивается как число вычислений ФП, необходимое для нахождения оптимума, и зависит от значений его параметров, например вероятности мутации и скрещивания. Выделяют два подхода [3] к выбору параметров: до запуска ЭА и во время его работы. В первом случае конкретные значения параметров алгоритма выбираются до запуска программы на основе либо некоторых теоретических оценок [4] времени работы алгоритма для поставленной задачи, либо предварительных практических тестов. Параметры выбираются для конкретного экземпляра задачи до запуска программы и не меняются в процессе ее выполнения. При этом, однако, оптимальное значение параметра может меняться. Поэтому необходим метод адаптивного выбора значений параметров ЭА.

В данном проекте рассматривается случай выбора параметра из некоторого вещественного диапазона. Зачастую эту задачу дискретизируют, разделяя диапазон допустимых значений параметра на интервалы. Такое разбиение может производиться до запуска алгоритма и не меняться в процессе его работы. Однако было показано, что изменение разбиения во время работы алгоритма повышает его эффективность [5, 6]. В частности, значение параметра можно подобрать тем точнее, чем меньше шаг разбиения.

Одним из наиболее эффективных методов выбора параметров ЭА с динамическим разбиением диапазона их значений является *EARPC* [5, 7]. В нем каждому выбранному значению параметра сопоставляется оценка его качества. Для назначения параметра ранее выбранные его значения, разбиваются на два кластера, например методом *k-means*. Затем диапазон значений параметра разбивается на два интервала. Для выбора точки разбиения все сохраненные ранее использованные значения параметра сортируются в порядке возрастания. Кандидатами на точку разбиения s_i являются середины между двумя соседними значениями. Для каждого такого кандидата строится разбиение сохраненных значений параметра на два множества. В первое входят значения параметров меньшие или равные s_i , во второе – большие. Для каждого значения s_i считается энтропия полученного разбиения. Для разбиения

диапазона используется то значение s_i , для которого энтропия минимальна. Один из полученных интервалов выбирается с вероятностью, пропорциональной среднему качеству значений параметров, лежащих в этом интервале. Назначение параметра определяется случайным образом из выбранного подынтервала.

Другой эффективный метод настройки параметров ЭА был недавно предложен в работе *Karafotias et al* (*K*-алгоритм) [7, 8]. В данном случае для выбора значений параметров используется обучение с подкреплением. Общая схема этого алгоритма выглядит следующим образом [9, 10]: агент применяет действие к среде, в результате чего среда возвращает ему некоторую награду и переходит в новое состояние. Агент использует полученную информацию для обучения и процесс повторяется. Целью агента является максимизация полученной награды.

В задаче выбора значений параметров ЭА в качестве среды выступает эволюционный алгоритм [11]. Действием агента является выбор одного из интервалов значений параметров и случайный выбор значения параметра из него. Среда использует выбранные значения параметров для генерации нового поколения. Награда, возвращаемая агенту средой, является некоторой функцией от значения оптимизируемой функции, вычисленной на особях текущего и предыдущего поколений. В зависимости от награды, полученной агентом, определяется, насколько успешно были подобраны параметры ЭА.

Множество состояний среды строится в ходе процесса оптимизации с помощью алгоритма *UTree* [12]. По своей структуре он представляет собой дерево решений, в узлах которого стоят условия на параметры среды. Каждому листу соответствует состояние s среды алгоритма обучения с подкреплением. В ходе работы алгоритма состояния среды переразбиваются с помощью критерия Колмогорова – Смирнова.

Отметим, что в *K*-алгоритме разбиение диапазона значений параметра на интервалы не меняется в ходе процесса оптимизации. Однако, как известно из работ [5, 6], динамическое разбиение интервала способно повысить эффективность метода выбора значений параметра. Сравнение данного подхода с методом *EARPC* также не выполнялось. Целью проекта является разработка, реализация и экспериментальное исследование метода адаптивной настройки параметров ЭА с помощью обучения с подкреплением, в котором множество действий агента формируется во время работы путем адаптивного разбиения диапазона допустимых значений параметра.

Предлагаемые методы адаптивной настройки параметров ЭА

В данной работе предлагается два метода адаптивной настройки параметров ЭА с помощью обучения с подкреплением. Один из них является комбинацией методов *EARPC* и *K*-алгоритма. Другой основан на использовании обучения с подкреплением и разбиением диапазона значений параметра с помощью критерия Колмогорова – Смирнова.

Метод на основе алгоритмов *EARPC* и *K*-алгоритма

В данном методе, как и в *K*-алгоритме, в процессе работы по наблюдаемым характеристикам ЭА строится дерево решений *UTree*. Однако в отличие от *K*-алгоритма выбор значений параметров происходит с помощью алгоритма *EARPC*. По наблюдаемым характеристикам ЭА происходит спуск по дереву решений до листа, а затем значения параметров выбираются алгоритмом *EARPC* на основе сохраненных в листе переходов (I, a, I', r) , где a – примененное действие, I и I' – наблюдаемые характеристики до и после применения действия a , а r – полученная награда. Для оценки качества выбранного назначения параметров в алгоритме *EARPC* используется награда, получаемая агентом.

При переразбиении состояний в дереве *UTree* с помощью критерия разбиения Колмогорова – Смирнова, для каждого перехода (I, a, I', r) , сохраненного в листе,

вычисляется значение ожидаемой награды $q(I, a) = r + \gamma V(s')$, где s' – лист, соответствующий характеристикам ЭА I' . Так как множество действий в отличие от K -алгоритма определяется динамически, то в качестве $V(s')$ предлагается использовать математическое ожидание награды в листе s' .

Алгоритм *EARPC* разбивает диапазон значений параметра на два подынтервала, один из которых выбирается с вероятностью пропорциональной средней награде на подынтервале. Таким образом, $V(s')$ вычисляется по выражению $V(s') = \sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2}{Q_1+Q_2}$, где Q_1 и Q_2 – средние значения награды на первом и втором подынтервалах соответственно.

Кроме того, после выделения новых состояний среды необходимо пересчитать значения ожидаемой награды для полученных состояний. В K -алгоритме значения из разбиваемого состояния копировались в новые состояния, то есть значения ожидаемой награды для полученных состояний не пересчитывались. В предлагаемом подходе при выделении нового состояния в соответствии с алгоритмом *UTree* множество переходов перераспределяется между полученными состояниями.

Метод с адаптивным выделением множества действий

Предварительные эксперименты показали, что использование большого числа состояний не повышает эффективность алгоритма. Поэтому в данном методе используется не дерево решений *UTree*, а одно состояние среды. Однако множество действий агента определяется динамически в ходе работы алгоритма.

Изначально у агента есть только одно действие – выбор значения параметра из всего диапазона. Он выбирает значение параметра v и получает награду r . В ходе работы алгоритма сохраняются кортежи (v, r) , которые используются для переразбиения диапазона значений параметра. Агент совершает единственное возможное действие до тех пор, пока не накопится достаточное число кортежей для переразбиения диапазона. Затем с помощью критерия Колмогорова – Смирнова находится точка разбиения диапазона. Критерий используется аналогичным способом, что и в K -алгоритме при разбиении состояний. Если точка разбиения не была найдена, диапазон не разбивается. Иначе получают два подынтервала, для которых процедура разбиения повторяется. Данный процесс повторяется i раз. Таким образом, максимальное число подынтервалов составляет 2^i .

Агент выбирает действие из полученных после разбиения, используя алгоритм Q -обучения с ε -жадной стратегией исследования среды до тех пор, пока значения ожидаемой награды не становятся примерно одинаковыми для всех возможных действий. В данном случае агент не может решить, какое из действий наиболее эффективно, поэтому текущее разбиение диапазона значений параметра пересчитывается.

Экспериментальное исследование

Эффективность предлагаемых методов оценивалась на четырех задачах численной оптимизации – функциях сферы, Розенброка, Леви и Растригина. Целью эволюционного алгоритма являлось нахождение вектора, на котором достигается минимум заданной функции с точностью $\varepsilon = 10^{-5}$. В качестве эволюционного алгоритма использовалась $(\mu+\lambda)$ эволюционная стратегия [2] с различными значениями параметров μ и λ . Настраиваемым параметром являлась сила оператора мутации, определяемого так же, как и в работах [7, 8]. Значение параметра выбиралось из интервала $[0, k]$, где k – константа. Чем ближе к оптимуму текущее решение, тем меньшее значение силы мутации должно выбираться. Результаты всех алгоритмов усреднялись за пятьдесят запусков.

Результаты

Результаты экспериментального сравнения методов адаптивной настройки параметров приведены в Таблице. Первые три колонки содержат значения k , μ и λ соответственно.

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

Следующие 16 колонок содержат среднее число итераций ЭА, необходимое для получения оптимума функций сферы, Растригина, Леви и Розенброка. Для каждой функции представлены результаты, полученные при использовании предлагаемого подхода с адаптивным выделением множества действий (А), К – алгоритма (К), метода *EARPC* (Е) и предлагаемого метода на основе алгоритмов *EARPC* и К-алгоритма (Е+К). В последней строке таблицы для каждого алгоритма указано общее число конфигураций, на которых данный алгоритм превзошел остальные. Для каждой конфигурации ЭА серым цветом выделены ячейки, содержащие лучший результат.

Таблица

Среднее число итераций, необходимое для достижения оптимума

k	μ	λ	Функция сферы				Функция Растригина				Функция Леви				Функция Розенброка			
			А	К	Е	Е+К	А	К	Е	Е+К	А	К	Е	Е+К	А	К	Е	Е+К
1	1	1	2434	8048	5258	4830	631	8385	7794	8689	496	7265	7986	14092	5124	13418	9003	12905
1	1	3	2207	2683	3942	3070	776	2069	3148	3610	1980	2903	2789	3688	2301	4167	3553	270
1	1	7	878	2620	1653	2247	226	1757	1422	1422	1321	1600	1923	3820	1411	2330	2296	1941
1	5	1	1450	2076	4472	3893	666	2281	4341	4530	1778	1865	2372	2246	1859	2809	5730	4453
1	5	3	569	824	1589	845	918	942	1958	2197	855	794	1632	2171	1053	748	1393	2749
1	5	7	368	473	642	568	502	675	1679	1329	356	444	1426	1236	401	665	1130	1258
1	10	1	703	747	1438	728	1008	1105	2681	2926	884	804	2353	1451	1617	1593	2213	3085
1	10	3	331	358	534	400	622	665	1460	1485	533	624	1491	1134	683	616	1161	1225
1	10	7	186	167	142	422	358	473	1103	1858	308	294	510	766	483	235	391	429
2	1	1	4342	28523	1738	6182	4744	21043	27865	9142	4947	4789	25721	30653	5165	27239	20005	20819
2	1	3	2333	6478	5152	4233	839	6825	9748	8997	2020	6601	7477	4612	3461	7169	7166	1334
2	1	7	1464	3739	1688	2956	160	2183	3806	4085	1205	2370	2533	2967	1753	2968	5874	7870
2	5	1	1891	3468	4908	5173	2467	4029	5961	5750	1935	3369	7222	5365	1990	5810	1153	1856
2	5	3	974	1163	1631	946	128	1780	2293	1720	1085	1326	3039	2943	1396	2705	3775	4542
2	5	7	616	756	1511	626	967	1461	933	1180	770	1089	1153	2180	934	1247	1775	2584
2	10	1	1164	1833	778	876	722	2255	2411	2807	1803	2197	5139	3072	2022	2787	8768	4603
2	10	3	459	465	719	788	988	1116	1486	1234	887	1006	1045	2381	1181	1106	3719	1648
2	10	7	188	252	380	413	615	712	627	922	618	564	806	1064	707	666	1740	2558
3	1	1	3055	29112	54868	30710	5159	23305	24249	27327	5216	21953	28900	35119	5535	36597	32533	43832
3	1	3	2826	9115	12446	1985	2821	10726	6541	16040	2900	7071	6966	10883	3391	9873	13061	10068
3	1	7	1427	4813	10118	9207	517	4266	4144	5408	1700	4019	3375	2062	2573	6462	9797	9775
3	5	1	2447	5886	3348	2313	2704	5419	5953	7665	3105	6742	10480	9059	3148	6791	8952	11581
3	5	3	1445	2222	1379	1848	544	2096	2823	2304	1808	2664	4593	3714	1721	3673	4434	6799
3	5	7	896	777	1424	1105	902	1629	1033	1055	1017	1788	594	1439	1231	1255	3951	4914
3	10	1	1996	2531	3173	3745	2048	3258	5095	3873	2071	2943	5210	4814	2352	6531	8320	10539
3	10	3	1053	1206	1114	171	296	1523	1013	1028	1330	1832	3140	2389	1677	1650	2611	2479
3	10	7	409	427	410	537	955	1203	779	839	667	799	521	845	1101	1098	1742	1907
Итого			20	2	2	1	22	0	3	0	19	4	2	0	19	5	0	0

Среднеквадратичное отклонение для предлагаемого подхода с адаптивным выделением множества действий составило 5 %, для K -алгоритма – 10 %, для метода $EARPC$ и предлагаемого метода на основе алгоритмов $EARPC$ и K -алгоритма – 40 %. Можно видеть, что с увеличением значения k выбор оптимального значения параметра σ затрудняется и для нахождения оптимума требуется больше итераций. Результаты, полученные с помощью предлагаемого подхода с адаптивным выделением множества действий, превосходят результаты остальных рассмотренных методов на большинстве конфигураций ЭА. В соответствии с множественным знаковым тестом [13] предлагаемый подход с адаптивным выделением множества действий статистически различим с остальными методами с уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

На рис. 1 представлены графики выбранных значений параметра σ в зависимости от номера итерации при оптимизации функции Растригина с помощью двух предложенных алгоритмов и K -алгоритма. Для остальных функций графики выглядят аналогично и не представлены для краткости. Можно видеть, что предлагаемый метод на основе алгоритмов $EARPC$ и K -алгоритма (рис. 1а) в конце оптимизации выбирает значения σ почти случайно. В K -алгоритме (рис. 1б) агент продолжает выбор действия, за которое получил положительную награду. Однако если агент на протяжении нескольких итераций не получает положительной награды, он теряет информацию о том, что это действие эффективно. Можно видеть, что предлагаемый подход с адаптивным выделением множества действий (рис. 1в) в начале оптимизации выбирает значение σ случайно, однако в процессе оптимизации значения σ сходятся к оптимуму.

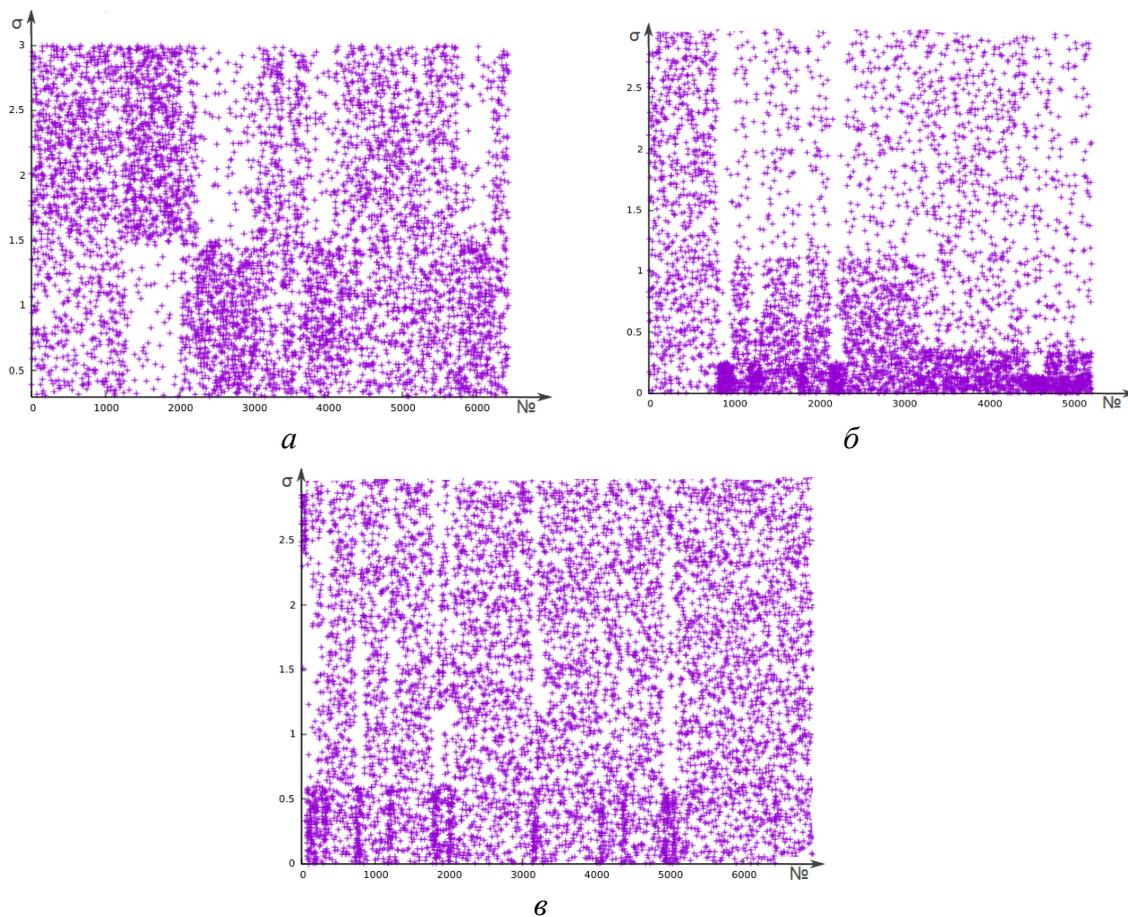


Рис. 1. Графики выбранных значений σ : а – в предлагаемом методе на основе алгоритмов $EARPC$ и K -алгоритма; б – в предлагаемом методе с адаптивным выделением множества действий; в – K -алгоритме

На рис. 2 для двух предлагаемых подходов представлены выбранные точки разбиения интервала значений параметра в зависимости от номера итерации. В K -алгоритме нет динамического разбиения интервала, поэтому данный вид графика к нему не применим. Для $EARPC$ данный график не представлен, так как полученные результаты с его помощью и с использованием предлагаемого метода на основе алгоритмов $EARPC$ и K -алгоритма почти одинаковы. Можно видеть, что на каждой итерации предлагаемого метода на основе алгоритмов $EARPC$ и K -алгоритма интервал разбивается на два почти одинаковых подынтервала (рис. 2а). Предлагаемый подход с адаптивным выделением множества действий (рис. 2б) не делит интервал допустимых значений параметра до тех пор, пока не накопит достаточное количество опыта. Затем после примерно 750 итераций интервал значений σ разбивается на четыре подынтервала. Переразбиение происходит после около 3150 итераций. Интервал переразбивается на три подынтервала. Отметим, что после переразбиения подынтервалы становятся более узкими в области оптимального значения σ . Таким образом, агент может более точно выбрать хорошее значение параметра. Это также можно видеть на рис. 1б. После около 3150 итераций алгоритма агент почти всегда выбирает значение σ близкое к оптимальному.

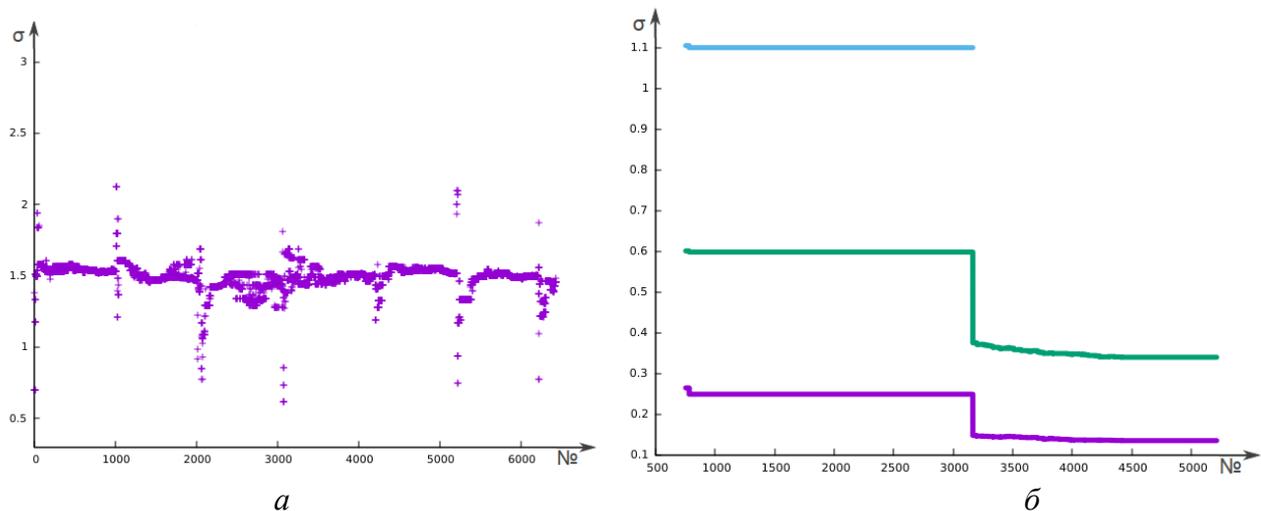


Рис. 2. Графики выбранных точек разбиения в предлагаемом методе: а – на основе алгоритмов $EARPC$ и K -алгоритма; б – с адаптивным выделением множества действий

Заключение

Предложено два метода адаптивной настройки параметров эволюционного алгоритма на основе обучения с подкреплением с динамическим разбиением диапазона значений. Один из них является комбинацией методов $EARPC$ и K -алгоритма. Во втором – с адаптивным выделением множества действий – диапазон значений параметра разбивается с помощью критерия Колмогорова – Смирнова и переразбивается, когда ожидаемая награда становится примерно одинаковой для всех действий агента.

Было проведено экспериментальное сравнение предложенных методов с методом $EARPC$ и K -алгоритмом на четырех модельных задачах для 27 конфигураций эволюционного алгоритма. На большинстве конфигураций для всех модельных задач наилучшие результаты были достигнуты с использованием предложенного подхода с адаптивным выделением множества действий. Для подтверждения статистической значимости был проведен множественный знаковый тест. Показано, что в отличие от остальных методов, данный метод позволяет более точно разбивать диапазон значений параметра на протяжении всего процесса оптимизации, что в свою очередь позволяет выбирать более оптимальное значение параметра на каждой итерации эволюционного алгоритма.

Публикации

Petrova I.A., Buzdalova A.S. Reinforcement learning based dynamic selection of auxiliary objectives with preservation of the best found solution // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. 2017. P. 1435–1438.

Литература

1. Скобцов Ю.А. Основы эволюционных вычислений. Донецк, 2008. – 326 с.
2. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms. Cambridge, 1998. – 158 p.
3. Eiben A.E. et al. Parameter control in evolutionary algorithms // Parameter Setting in Evolutionary Algorithms. Berlin, 2007. P. 19–46.
4. Doerr B. et al. Mutation rate matters even when optimizing monotonic functions // Evolutionary Computation. 2013. Vol. 21. No 1. P. 1–27.
5. Aleti A., Moser I. Entropy-based adaptive range parameter control for evolutionary algorithms // Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'13). 2013. P. 1501–1508.
6. Aleti A. et al. Adaptive range parameter control // IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2012. P. 1–8.
7. Karafotias G. et al. Parameter control in evolutionary algorithms: trends and challenges // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2015. Vol. 19. No 2. P. 167–187.
8. Karafotias G. et al. Generic parameter control with reinforcement learning // Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'14). 2014. P. 1319–1326.
9. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement learning: an introduction. Cambridge, 1998. – 344 p.
10. Николенко С.И., Тулупьев А.Л. Самообучающиеся системы. М., 2009. – 288 с.
11. Eiben A.E. et al. Reinforcement learning for online control of evolutionary algorithms // Proceedings of the 4th International Workshop on Engineering Self-Organizing Applications (ESOA'06). 2006. P. 151–160.
12. Uther W.T.B., Veloso M.M. Tree based discretization for continuous state space reinforcement learning // Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-98), Tenth Innovative Applications of Artificial Intelligence (IAAI-98): Proceedings. 1998. P. 769–774.
13. Derrac J. et al. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms // Swarm and Evolutionary Computation. 2011. Vol. 1. No 1. P. 3–18.



Пинкевич Василий Юрьевич
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра вычислительной техники
E-mail: vasilii.pinkevich@yandex.ru

МЕТОДИКА ОТЛАДКИ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ

В.Ю. Пинкевич

Научный руководитель – профессор А.Е. Платунов

Наиболее сложную часть современных встроенных вычислительных систем составляет специализированное программное и аппаратное обеспечение, предназначенное для реализации целевых вычислений с требуемой степенью надежности и быстродействия [1–3]. До половины времени разработки встроенных систем уходит на отладку (поиск и исправление ошибок) [4] вычислительной составляющей. Отладка осложняется трудностями в повторении сценариев, в которых возникает ошибка в целевом окружении системы, и ограниченными возможностями отладочных интерфейсов. Одним из тяжело устранимых видов ошибок считаются так называемые плавающие ошибки, которые возникают только при совпадении определенного набора условий. Установление этих условий является ключом к исправлению ошибок [4].

Предложенная методика отладки встроенных систем предназначена для решения указанных проблем. Она использует подход, подразумевающий запись и детерминированное воспроизведение вычислительного процесса [5, 6]. В отличие от существующих методик с аналогичным подходом, предлагается выполнять запись и воспроизведение в терминах прикладных событий вычислительного процесса, описанных в рамках высокоуровневой модели прикладной задачи. Данное отличие позволяет уменьшить объем данных, которые заносятся в журнал, и внедрить необходимую отладочную подсистему практически в любую существующую встроенную систему. Предложенная методика поддерживает запись и воспроизведение частичного журнала событий, что вместе с использованием высокоуровневой модели обеспечивает возможность целенаправленной отладки строго определенного интересующего момента вычислительного процесса.

Методика предназначена в первую очередь для управляющих систем реального времени, распределенных встроенных систем и систем из многих компонентов, доступ к которым традиционными средствами управления и отладки отсутствует или затруднен.

По результатам сравнения существующих моделей спецификации вычислительного процесса для предложенной методики выбрано представление вычислительного процесса в виде граф-схемы алгоритма (ГСА). Такая модель достаточно универсальна и схожа с широко применяемым представлением алгоритмов в виде блок-схем. Она обладает развитым математическим аппаратом для анализа и различных преобразований. Модель ГСА более выразительна, чем модель конечных автоматов, и совместима с ней. Это дает возможность представления конечного автомата в виде ГСА.

Модель ГСА позволяет описывать вычислительный процесс на разных уровнях абстракции. Применяется как к программной, так и к аппаратной его реализации и совмещается с существующими маршрутами разработки и отладки вычислительных

систем, которые используют модель конечных автоматов как одну из основных для описания вычислительного процесса.

Благодаря ГСА можно представить необходимые последовательности событий, происходящих во время вычислительного процесса, и взаимосвязи между ними. Модель вычислительного процесса, используемая при отладке, может содержать минимальный набор взаимосвязей, который позволяет однозначно описать только интересующие события. Второстепенные взаимосвязи могут не учитываться. Соответствие модели вычислительному процессу обеспечивается составителем модели.

Отладка с применением предложенной методики имеет свою сферу применимости. Она дает возможность исследовать только те ошибки и зависимости, которые отражены в составленной модели. Если ошибочное поведение системы вызвано явлениями, не учтенными в модели, или явлениями более низкого уровня (например, ошибкой доступа к памяти и пр.), то выявить причину таких ошибок с помощью имеющейся высокоуровневой модели вычислительного процесса будет невозможно.

Для использования предложенной методики целевой вычислительный процесс должен быть описан в рамках формальной модели таким образом, чтобы охватывать все необходимые события ввода и вывода данных без нарушения последовательности событий в ходе работы (например, без пропуска событий). Составитель модели должен гарантировать, что вычислительный процесс, описанный данной моделью, может быть воспроизведен детерминированным образом. Неверно составленная модель может приводить к ошибкам воспроизведения, особенно в случае циклических программ. Например, при нарушении синхронизации счетчиков циклов в целевом вычислительном процессе и отладочной модели ввод необходимых данных будет выполнен не на той итерации.

В общем случае невозможно обеспечить автоматическую проверку того, что некоторая модель вычислительного процесса обладает данным свойством, поскольку может быть неформальной и ее соответствие целевому вычислительному процессу зависит от прикладной задачи. Однако, если существует формальное описание целевого вычислительного процесса (например, в виде конечного автомата), то могут быть разработаны соответствующие методы сопоставления исходной и отладочной моделей.

Модель вычислительного процесса, описанного в виде ГСА, представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются операторные вершины ГСА, а дугами – пути, связывающие их вершины. Условные вершины не включаются в граф. Таким образом, как при записи, так и при воспроизведении в любой момент времени с вычислительным процессом может быть сопоставлена некоторая вершина на графе. Она показывает позицию, которой достиг вычислительный процесс. Если граф имеет циклы, то для идентификации позиции требуется не только текущая вершина, но и дополнительная информация, которая позволит отличать итерации вычислительного процесса.

При использовании полного журнала записи могут выбираться из него по очереди, так как их последовательность полностью описывает траекторию вычислительного процесса в графе. Тем не менее, чтобы обеспечить воспроизведение вычислительного процесса с теми же временными характеристиками, с которыми он был записан, необходимо добавлять к записям в журнале метки времени.

Одним из важных сценариев использования предложенной методики является отладка взаимодействия целевой системы с внешним окружением при его отсутствии. Для этого используется режим частичного воспроизведения вычислительного процесса, под которым понимается такое его воспроизведение, когда часть входных данных вводится обычным образом (как при работе в целевом режиме), а часть вводится из заранее подготовленного журнала с помощью системы воспроизведения. При этом в целевом режиме данные могут вводиться всегда при попадании вычислительного процесса в определенную вершину ГСА, или только на определенных итерациях вычислительного процесса в данной вершине.

Для удовлетворения перечисленным выше требованиям сформулируем задачу идентификации позиции, в которой в конкретный момент находится вычислительный процесс: должна быть обеспечена возможность однозначной идентификации каждого попадания вычислительного процесса в конкретную вершину графа, в том числе идентификация времени данного попадания.

Будем называть активными те вершины графа, информация о попадании в которые вычислительного процесса требуется для корректной работы отладочной инфраструктуры. То есть в этих вершинах необходимо выполнить запись или воспроизведение. Остальные вершины будем называть неактивными. Они могут появиться в графе, если он описывает полный вычислительный процесс, но в конкретном случае требуется информация только о части вершин.

Предусмотрим возможность пометить вершины графа с помощью счетчиков. Тогда различные итерации вычислительного процесса можно будет различить по разным значениям счетчиков. Введем счетчики двух типов: логический (инкрементируется по специальному указанию) и таймер (инкрементируется автоматически с определенным интервалом времени). Вершины также могут быть помечены действиями со счетчиками: инкремент счетчика (только для логических счетчиков) и сброс.

Каждая вершина графа может быть помечена произвольным количеством счетчиков или действий со счетчиками. Пометки вершин как счетчиками, так и действиями с ними, выбираются исходя из особенностей прикладной задачи и требований к задачам отладки в каждом конкретном случае.

Теорема. Для выполнения требований по однозначной идентификации позиции вычислительного процесса должны соблюдаться следующие условия:

- каждая активная вершина, входящая хотя бы в один контур графа, должна быть помечена как минимум одним счетчиком;
- каждый простой контур, который содержит вершину с пометками счетчиками, как минимум для одного из этих счетчиков должен содержать также вершину с его инкрементом и не содержать вершины с его сбросом; для таймеров требование инкремента не устанавливается, поскольку выполняется автоматически.

Доказательство:

- если вершина, входящая в контур, не будет содержать пометки счетчиком, то будет невозможно различить попадания вычислительного процесса в эту вершину на разных итерациях по контуру;
- если контур (являющийся простым путем) с вершиной со счетчиком не будет содержать вершины с его инкрементом или будет содержать вершины и с инкрементом, и со сбросом, то на двух разных итерациях значения счетчиков могут совпадать, и их будет невозможно различить.

Следствия:

- если инкремент логического счетчика выполняется в той же самой вершине, где используется пометка счетчиком, то это гарантирует выполнение требований теоремы;
- если в данной вершине используется пометка несколькими счетчиками, достаточно, чтобы в каждом из простых контуров, содержащих эту вершину, не сбрасывался хотя бы один из счетчиков.

Отладочная подсистема включает в себя инфраструктуру, которая должна быть внедрена в целевую встроенную вычислительную систему для реализации предложенной методики отладки. Инфраструктура содержит следующие основные части:

- отладочного агента (выполняет работу с журналами входных и выходных данных) – является главным активным компонентом; отслеживает текущее состояние вычислительного процесса, определяет необходимые действия по записи/воспроизведению в каждый момент времени, сохраняет данные в журнал и считывает их из него;

– интерфейс между целевым вычислительным процессом и отладочным агентом необходим для извещения отладочного агента о наступлении событий в целевом вычислительном процессе, а также для ввода и вывода отладочных данных из него;

– память журналов требуется для хранения журналов и организации доступа к их записям.

Реализация компонентов инфраструктуры зависит от того, на какой платформе разрабатывается целевой вычислительный процесс. Основными рассматриваемыми вариантами платформ являются программируемый процессор общего назначения (например, в составе микроконтроллера или системы на кристалле) и жесткая аппаратная логика, реализуемая на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) или в составе системы на кристалле. Возможны также различные программно-аппаратные системы со специализированными вычислителями и расширениями для программируемых процессоров. Следовательно, при реализации отладочной инфраструктуры будут необходимы специальные программно-аппаратные решения. Область применения предлагаемой методики не ограничивается указанными платформами. Возможно ее внедрение в рамках различных операционных систем и других программных сред.

Составление высокоуровневой модели вычислительного процесса является неформализованным процессом, а в качестве атомарных событий ГСА могут выступать произвольные наборы вычислительных операций и операций ввода-вывода. В связи с этим реализация интерфейса между целевым вычислительным процессом и отладочным агентом (указание мест целевого вычислительного процесса, соответствующих вершинам ГСА, и ввод/вывод отладочных данных) должна выполняться путем ручной доработки исходного кода целевой вычислительной системы. В дальнейшем при отсутствии необходимости в отладке данный инструментальный код может быть оставлен в целевой системе, но не должен использоваться.

Варианты реализации отладочной подсистемы.

1. Для отладки вычислительного процесса, локализованного на одном процессорном ядре, отладочный агент может представлять собой отдельный программный модуль, реализованный в виде набора функций (процедур) или фонового процесса в используемой программной среде. Интерфейс между отладочным агентом и целевым вычислительным процессом может представлять собой набор вызовов специальных функций или доступ через средства межпроцессного взаимодействия. Преимуществами данной архитектуры являются относительная простота реализации и отсутствие необходимости в дополнительных аппаратных ресурсах. Недостаток состоит в том, что работа отладочного агента занимает процессорное время и вносит определенную погрешность в работу целевого вычислительного процесса.

2. Для отладки вычислительного процесса, распределенного на несколько процессорных ядер или реализованного аппаратно на ПЛИС, целесообразно выделить индивидуальное процессорное ядро под отладочный агент. Интерфейс между целевым вычислительным процессом должен быть реализован в виде прерываний к выделенному процессорному ядру для извещения агента о наступлении событий и интерфейса памяти для ввода и вывода отладочных данных. Преимущество данной архитектуры в минимальном влиянии работы отладочной подсистемы на целевой вычислительный процесс. Недостаток связан с требованием дополнительных аппаратных ресурсов, в том числе для реализации интерфейса с отладочным агентом.

Для проверки предложенной методики разработан прототип ядра отладочного агента на языке C для реализации на процессорных ядрах микроконтроллеров различного назначения. Данное ядро является универсальным и настраивается для работы с той или иной моделью вычислительного процесса специальными конфигурационными массивами.

Для обеспечения необходимых возможностей работы с высокоуровневой моделью и журналом, а также взаимодействия с отладочной подсистемой разработан набор автоматизированных инструментальных средств:

- средства ввода, просмотра и редактирования ГСА, описывающие высокоуровневые модели вычислительного процесса; реализована возможность аннотирования операторных вершин графа счетчиками и действиями с ними;

- компилятор описания высокоуровневой модели в конфигурационные массивы для отладочного агента;

- средства просмотра, фильтрации, редактирования и сохранения журналов событий.

Ввод высокоуровневой модели в виде ГСА реализуется в текстовом виде в виде псевдокода на языке *Python*. Для этого определены специальные классы, представляющие все необходимые элементы модели.

Все разработанные автоматизированные средства были проверены в рамках демонстрационного проекта – программы на микроконтроллере, взаимодействующей по сетевым интерфейсам с другими микроконтроллерами и центральным сервером. Проект реализован на плате с ПЛИС *Xilinx Nexys 4-DDR*. Максимальный размер графа использованной высокоуровневой модели – 14 вершин, 22 дуги; объем журнала – около 1 МБ.

Публикации

1. *Kustarev P.V., Bikovsky S.V., Pinkevich V.Yu.* Hardware violation monitor of transaction level real-time constraints for reliable systems on a chip // 14th GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing. Conference Proceedings. 2014. Book 2. Vol. 1. P. 201–208.
2. *Kustarev P.V., Bikovsky S.V., Pinkevich V.Yu.* Functional monitoring of SoC with dynamic actualization of behavioral model // 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2015). Proceedings. Budva, 2015. P. 85–88.
3. *Pinkevich V.Yu., Yanalov R.I., Platonov A.E.* Hardware computational units design with combined debug capabilities // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2017). Conference Proceedings. 2017. Vol. 17. No 21. P. 77–84.

Литература

1. *Marwedel P.* Embedded system design. Embedded systems foundations of cyber-physical systems. Houten, 2011. – 440 p.
2. *Платунов А.Е.* Встраиваемые системы управления // Control Engineering Россия. 2012. № 5 (42). С. 26–34.
3. *Law G.* Speeding up software debugging [Electronic resource] // Embedded Computing Design [Official website]. URL: <http://embedded-computing.com/articles/speeding-software-debugging/> (accessed: 01.07.2017).
4. *Карпов Ю.Г.* Model checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб., 2010. – 560 с.
5. *Lettnin D., Winterholer M.* Embedded software verification and debugging. New York, 2017. – 208 p.
6. *Honarmand N., Torrellas J.* Replay debugging: leveraging record and replay for program debugging // 2014 ACM/IEEE 41st International Symposium on Computer Architecture (ISCA). Minneapolis, 2014. P. 455–456.



Пихуров Дмитрий Витальевич
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра информационных технологий топливно-энергетического
комплекса
E-mail: nefaeron@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ И УГЛЕРОДНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Д.В. Пихуров

Научный руководитель – профессор В.В. Зуев

Цель работы – получение пенополиуретана с улучшенными теплоизоляционными и механическими свойствами.

Введение

Прекрасные термоизоляционные свойства пенополиуретанов позволяют широко использовать их в промышленности. Существует несколько методов улучшения свойств пен, среди которых – введение микро- и наноразмерных частиц, модифицирующих структуру ячеек полиуретана в соответствии с требованием конкретного заказа [1–3].

Количественное описание внутренней морфологии полиуретановых пен открывает путь для контроля их свойств. Это сложный комплекс взаимодействий, включающий в себя фазовое разделение внутренних доменов полимера, а также формирование газовой фазы в реагирующей смеси. В связи с этим было предложено случайное формирование нуклеационных центров образования газовой фазы. Такая картина хорошо описывается моделью обратимой агрегации Килиана [4], которая связывает энергию активации образования агрегата в системе с его размерами.

Модель Килиана дает количественное описание размеров пор в материале. Для анализа же механизмов формирования ячеистой структуры может использоваться метод ИК-Фурье спектроскопии, который позволяет определить степень фазового разделения полимера, что отражает доменную структуру матрицы.

Экспериментальная часть. Синтез

Полиол и полиизоцианат осушались под вакуумом при температуре 60°C. Наполнители добавлялись к полиолу или полиизоцианату, в зависимости от их сродства. Углеродные наполнители вмешивались в полиизоцианат, оксиды в полиол. После этого смесь размешивалась ультразвуковой мешалкой в течение двух часов для лучшего диспергирования наполнителя. Для приготовления преполимера использовались соотношения полиизоцианата и полиола, при которых результирующая смесь обладала бы 11 % остаточных групп [NCO]. Полученный преполимер вспенивался с помощью водного раствора катализатора и помещался в шкаф при температуре 60 °C с целью ускорения процесса.

Результаты

Микроскопия. Для микроскопии использовались срезы образцов. Большая часть ячеек характеризовалась сферической формой и закрытостью (рис. 1). Цель оптической микроскопии состояла в статистическом анализе размеров ячеек и получения распределения размеров пор. Фотографии ячеек были сегментированы и проанализированы

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

с использованием модели обратимой агрегации Килиана [4]. На рис. 2 показан пример гистограмм распределения площади ячеек. Как видно из графика, нами было получено двойное распределение, поскольку все попытки описания распределения единственным ансамблем не увенчались успехом. Это говорит о том, что одновременно в реакционной смеси происходят два процесса – нуклеация, приводящая к образованию новых ячеек, и коалесценция, способствующая увеличению их размера за счет слияния.

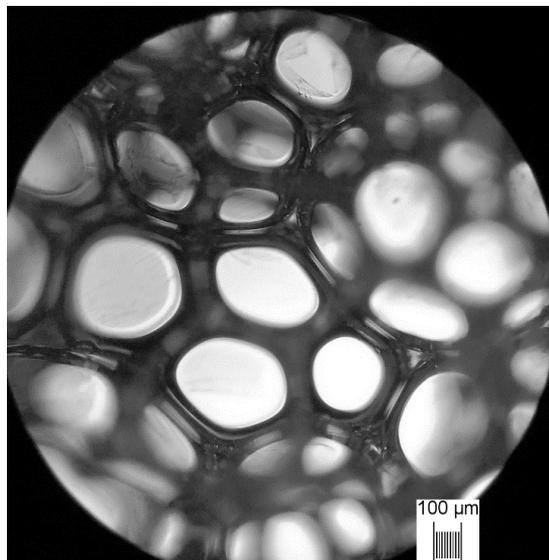


Рис. 1. Срез образца

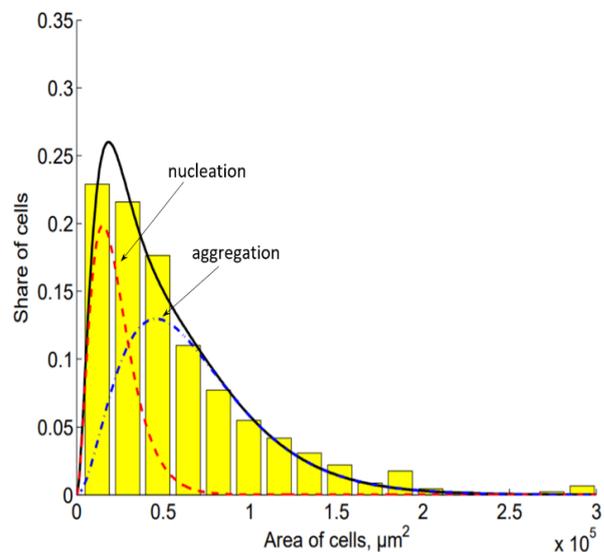


Рис. 2. Гистограмма распределения размеров ячеек для образца с 0,3 % Cr_2O_3

Кроме того, из параметров распределений были получены значения средних размеров ячеек для каждого из распределений. Оказалось, что введение частиц не изменяет морфологии пор, однако становится причиной увеличения их размера. Это может быть объяснено следующим образом. Наночастицы играют роль нуклеационных центров, рядом с которыми начинают расти зародыши пузырьков, поэтому распределение зародышей в объеме полимера неравномерно, а сконцентрировано вокруг частиц, что в конечном итоге, после достижения зародышами размера пузырька, приводит к превалированию коалесценции над нуклеацией.

Некоторые отклонения в зависимости размера ячеек от наполнения полимера частицами можно легко объяснить их высокой агрегацией, поскольку даже ультразвуковое перемешивание не обеспечивает достаточной дисперсии. Кроме того, присутствие частиц в стенках ячеек также стимулирует коалесценцию даже на поздних этапах, когда размеры пузырьков становятся в разы больше размеров частиц.

Механические свойства. Результаты механических испытаний, а также значения средних размеров ячеек представлены в Табл. 1.

Механические свойства пен зависят от двух параметров: свойств материала стенок и распределения ячеек. Согласно Гибсону и Эшби, модуль Юнга пен не зависит от размеров ячеек [5]. Таким образом, различия в модуле Юнга объясняются именно введением наномодификатора в полимерную матрицу. Кроме того, введение оксида хрома (III) приводит к снижению механических характеристик на всех концентрациях. При этом наилучший показатель демонстрирует углеродная сажа, поскольку вместе с увеличением модуля Юнга, также увеличивается относительное удлинение образцов, что крайне важно для потребительских характеристик пенополиуретанов. Для того чтобы объяснить механизмы, приводящие к полученным эффектам, была проведена спектроскопия образцов, направленная на анализ внутренней структуры полимера.

Таблица 1
Механические и структурные характеристики образцов

Наполнение, %	Модуль Юнга, МПа	Предел прочности, МПа	Средний размер ячеек d_1, мкм	Средний размер ячеек d_2, мкм	DPS для уретановых связей	DPS для мочевиновых связей
Исходный полимер	4,29	0,51	112	246	0,915	0,557
Фуллереновая сажа						
0,075	4,81	0,59	205	309	0,799	0,214
0,15	4,59	0,59	203	308	0,733	0,230
0,3	4,49	0,57	195	302	0,747	0,225
0,6	4,44	0,54	171	300	0,858	0,437
Модифицированная фуллереновая сажа						
0,075	4,27	0,50	202	298	0,988	0,589
0,15	4,40	0,55	204	301	0,990	0,625
0,3	4,49	0,49	195	305	0,989	0,621
0,6	4,63	0,52	171	309	0,993	0,630
Оксид алюминия (III)						
0,075	4,82	0,57	114	200	0,959	0,547
0,15	4,82	0,56	125	226	0,956	0,545
0,3	4,88	0,57	140	253	0,959	0,534
0,6	4,86	0,57	137	242	0,959	0,525
Оксид хрома (III)						
0,075	4,26	0,53	233	313	0,966	0,535
0,15	4,26	0,52	165	301	0,981	0,544
0,3	3,82	0,46	154	242	0,953	0,547
0,6	3,79	0,46	145	240	0,960	0,573

ИК-Фурье-спектроскопия. Степень микрофазового разделения (*DPS*) может быть определена с использованием ИК-спектроскопии при сравнении пиков водородно-связанных и свободных карбонильных групп в уретановых и мочевиновых связях. Позиции характеристических пиков оставались одинаковыми для всех образцов, однако соотношения интенсивностей менялись. Результаты анализа можно увидеть в Табл. 1. Существует несколько типичных для образцов пиков: это 1711 см^{-1} , соответствующий связанным карбонильным группам, 1731 см^{-1} – свободным уретановым группам, 1688 см^{-1} – свободным мочевиновым группам, 1666 см^{-1} и 1654 см^{-1} – связанным мочевиновым группам [6]. Микрофазовое разделение рассчитывается по следующему уравнению:

$$DPS = \frac{A_b}{A_f + A_b} \quad (1)$$

где A_b и A_f – интегрированное поглощение водородно-связанных и свободных молекулярных групп соответственно. Параметр *DPS* может принимать значения от 0 до 1, которые соответствуют однофазной системе. В чистом полиуретане водородно-связанные компоненты приходятся только на жесткие домены полимерной матрицы. В результате можно показать, что при введении всех наполнителей доля связанных групп увеличивается, чем легко объясняется увеличение механических свойств полимера под действием наполнителя. Остается вопрос, является ли увеличение числа связанных групп следствием увеличения жестких доменов в матрице или следствием связи функциональных групп с наполнителем. Чтобы ответить на него, а также чтобы проанализировать доменную структуру была исследована диэлектрическая спектроскопия полиуретановых композитов.

Диэлектрическая спектроскопия. Для диэлектрической релаксации полиуретанов характерны три пика, соответствующие потерям в стеклообразном состоянии (γ -процесс и β -процесс), а также сегментальная подвижность, появляющаяся после нагревания полимера выше температуры стеклования (α -процесс) (рис. 3). Кроме этих характеристичных пиков на графиках обнаруживается MWS-поляризация, отвечающая поляризации электродов. Для выделения каждого пика и его математического описания была выбрана модель релаксации Гавриляка – Негами:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+i\omega\tau_{HN})^{1-\alpha}\beta}, \quad (2)$$

где ε^* – комплексная диэлектрическая функция, $\omega = 2\pi f$, f – частота поля, $\Delta\varepsilon$ – интенсивность диэлектрического процесса, $\tau_{HN} = 1/2\pi f_{HN}$ – позиция пика в частотном домене, ε_∞ – диэлектрическая проницаемость при бесконечной частоте поля, α и β – параметры формы пиков, такие как полуширина и симметрия. С помощью модели Гавриляка – Негами получены значения резонансных частот релаксационных процессов в зависимости от температуры полимера. Используя их, можно получить зависимость Фогеля – Фулчера – Таммана, которая отражает зависимость времени релаксации от обратной температуры:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{DT_0}{T-T_0}\right), \quad (3)$$

где τ_0 – время релаксации при бесконечно большой температуре, T_0 – температура Вогеля, при которой релаксационный процесс стремится к бесконечности, и D – параметр хрупкости.

Результаты измерений показали, что введение наполнителя всегда увеличивает температуру стеклования полимера, и происходит это из-за эффекта антипластификации. Причем для гидрофильных наполнителей эффект влияния на параметр хрупкости более высокий, чем у гидрофобных. Это свидетельствует в пользу теории об образовании водородных связей именно между наполнителем и матрицей, а не внутри жестких доменов.

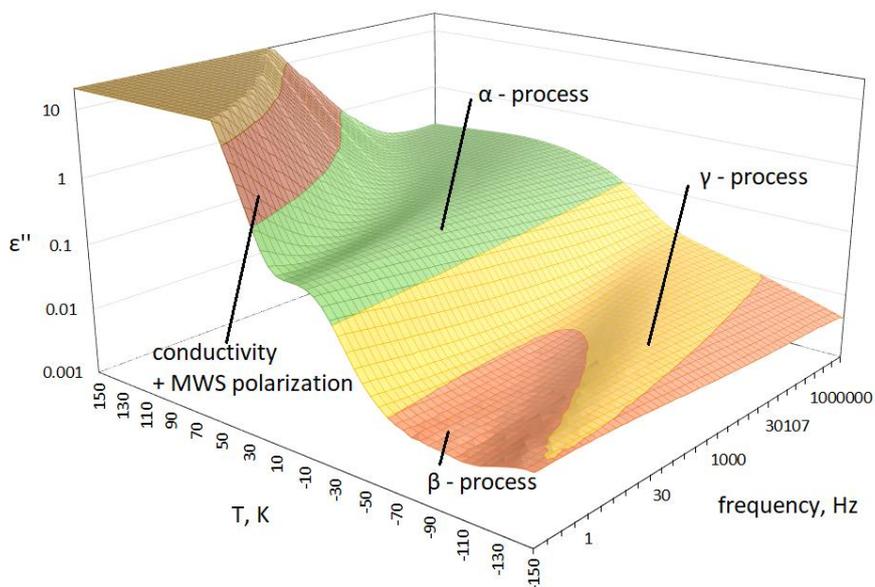


Рис. 3. Поверхность диэлектрических потерь для полиуретана

Заключение

Результаты выполнения работы показали, что введение всех наполнителей, кроме оксида хрома (III), приводит к повышению прочности полимера. Лучшими показателями в данном случае обладали образцы с фуллереновой сажой, поскольку они не только демонстрировали повышение предела прочности и модуля Юнга, но и увеличение

относительного удлинения, а также наивысшую теплопроводность. Таким образом, по совокупности всех характеристик, модифицированная фуллереновая сажа как наполнитель показала оптимальный результат.

Публикации

1. *Pikhurov D.V., Zuev V.V.* Synthesis and mechanical characterization of nanoparticles infused polyurethane foams. Statistical analysis of foam morphology // *Journal of Macromolecular Science. Part B. Physics.* 2017. Vol. 56. No 7. P. 462–473.
2. *Pikhurov D.V., Zuev V.V.* Synthesis and mechanical characterization of nanoparticle-infused polyurethane foams. Statistical analysis of foam morphology // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics.* 2016. Vol. 7. No 3. P. 464–471.
3. *Пухуров Д.В., Зуев В.В.* Анализ влияния гидрофильных и гидрофобных модификаторов на структуру и свойства пенополиуретанов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/5961/5961.pdf> (дата обращения: 20.09.2017).

Литература

1. *Saha M.C. et al.* Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles // *Materials Science and Engineering: A.* 2008. Vol. 476. P. 213–222.
2. *Sung G., Kim J.H.* Influence of filler surface characteristics on morphological, physical, acoustic properties of polyurethane composite foams filled with inorganic fillers // *Compost Science and Technology.* 2017. Vol. 145. P. 147–154.
3. *Cao X. et al.* Polyurethane clay nanocomposite foams: processing, structure and properties // *Polymer.* 2005. Vol. 46. P. 775–783.
4. *Kilian H.G. et al.* Aggregate model of liquids // *The Journal of Chemical Physics.* 1997. Vol. 107. No 20. P. 8697–8705.
5. *Gibson L.J., Ashby M.F.* Cellular solids: structure and properties. Oxford, 1988. – 357 p.
6. *Bisticic L. et al.* Hydrogen bonding and mechanical properties of thin films of polyether-based polyurethane-silica nanocomposites // *European Polymer Journal.* 2010. Vol. 46. No 10. P. 1975–1987.



Погорелая Дарья Андреевна
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра световодной фотоники
E-mail: pdaria@mail.ru

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТКЛИКА ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Д.А. Погорелая

Научный руководитель – доцент В.Е. Стригалева

Датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) являются одной из наиболее динамично развивающихся технологий в области волоконно-оптических

сенсорных систем [1, 2]. ВБР представляет собой участок волокна, в сердцевине которого сформирована периодическая структура показателя преломления, имеющая функцию спектрально-селективного фильтра и обладающая узким спектром отражения. Длина волны отраженного света изменяется при механическом сжатии или растяжении волокна, а также при изменении температуры, что определило широкое использование ВБР в качестве чувствительного элемента в волоконно-оптических датчиках.

Датчики на основе ВБР применяются для мониторинга различных физических величин, таких как механическое напряжение, вибрация, акустические колебания, ускорение, давление, температура в разных отраслях: строительстве, энергетике и машиностроении. К достоинствам таких сенсоров стоит отнести компактные размеры и малый вес чувствительных элементов, отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам, возможность мультиплексирования и полную взрыво- и пожаробезопасность благодаря отсутствию токоведущих частей [3]. Недостатками сенсорных систем на основе ВБР являются высокая стоимость устройств обработки сигналов, а также их сравнительно крупные габариты и большой вес. В связи с этим актуальной является задача миниатюризации и удешевления устройств обработки сигналов от таких датчиков.

Цель проекта – создание нового малогабаритного устройства регистрации спектрального отклика волоконно-оптических датчиков на ВБР, имеющего в своей основе перестраиваемый узкополосный источник оптического излучения, обладающий высокой разрешающей способностью и высокой частотой опроса.

Для достижения этой цели требуется решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методов создания устройств регистрации сигнала волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках;
- создать и исследовать метод регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках;
- провести поиск и исследование малогабаритного источника оптического излучения, позволяющего осуществлять опрос датчиков на волоконных брэгговских решетках;
- провести математическое моделирование обработки сигнала устройства регистрации для волоконно-оптических датчиков в среде *MatLab Simulink*;
- создать и исследовать макет быстродействующего малогабаритного устройства регистрации сигнала волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках.

Одно из основных преимуществ разрабатываемого устройства регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков заключается в наличии встроенного в регистратор малогабаритного источника оптического излучения, позволяющего осуществлять опрос ВБР. В качестве возможного решения был найден перестраиваемый поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором типа *VCSEL*. Эти лазеры появились на рынке совсем недавно, но уже широко используются в линиях связи благодаря своим малым габаритам [4] и низкой стоимости, однако применение их в волоконно-оптических датчиках является новым и малоизученным. Поэтому необходимо провести исследование *VCSEL* и разработать способ модуляции/демодуляции его излучения, позволяющий опрашивать датчики на ВБР.

Недостатком известных аналогов устройства регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков является их физический принцип работы, связанный с облучением исследуемой ВБР широкополосным источником оптического излучения и дальнейшим спектральным демultipлексированием отраженного от ВБР света с помощью поворота дифракционной решетки. Он требует прецизионной оптической сборки, что значительно увеличивает стоимость прибора и снижает вибрационную устойчивость регистратора. В разрабатываемом устройстве регистрации используется другой физический принцип – токовая модуляция *VCSEL*. На лазерный диод подается токовый импульс, и пока

он длится, изменяется центральная длина волны его излучения, в результате чего происходит сканирование спектра исследуемой ВБР.

Схема датчика, включающая чувствительный элемент (ВБР) и разрабатываемый интеррогатор ВБР, изображена на рис. 1.

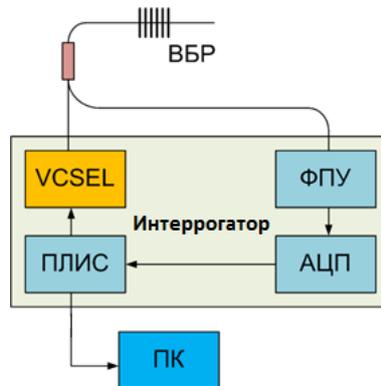


Рис. 1. Схема волоконно-оптического датчика на ВБР, включающая разрабатываемый интеррогатор – устройство регистрации спектрального отклика ВБР

Для оценки параметров точности предлагаемого метода было проведено математическое моделирование алгоритма обработки сигнала с использованием графической среды программирования *Simulink* в составе программного пакета *MatLab*. Математическая модель позволила оценить величину вносимой в результирующий информационный сигнал ошибки в зависимости от формы сигнала модуляции и параметров электронных устройств, используемых в схеме, таких как битность АЦП и частота дискретизации информационного сигнала.

На основе проведенных исследований было предложено создание быстродействующего малогабаритного устройства регистрации спектральных параметров для волоконно-оптических датчиков на основе решеток Брэгга, использующего в качестве механизма перестройки длины волны источника излучения температурные изменения внутри активной области. В качестве перестраиваемого узкополосного источника оптического излучения для такой системы был предложен лазерный диод типа *VCSEL*. Управление температурой активной области *VCSEL* производится с помощью модулирующих токовых импульсов, подаваемых на него. На рис. 2 показана динамика изменения центральной длины волны излучения лазерного диода типа *VCSEL* при подаче на него прямоугольного модулирующего токового импульса длительностью 50 мкс и амплитудой 12 мА из-за нагрева его активной области.

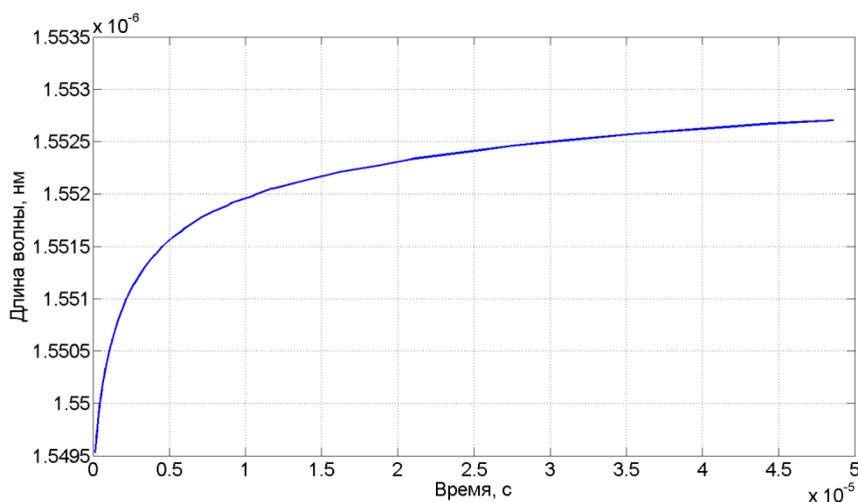


Рис. 2. Зависимость изменения центральной длины волны излучения лазерного диода типа *VCSEL* от времени при подаче на него прямоугольного токового импульса

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

Схема предлагаемого устройства регистрации спектральных параметров ВБР с использованием токовой модуляции VCSEL представлена на рис. 3:



Рис. 3. Схема устройства регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков на основе ВБР

Приведенная схема состоит из источника оптического излучения типа *VCSEL*, оптической схемы, фотоприемного устройства (ФПУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а также программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), включающей в себя блоки конвертирования, вычисления спектральных характеристик и контроля перестройки длины волны излучения.

Недостатком известного аналога устройства регистрации спектрального отклика волоконно-оптических датчиков на основе ВБР с использованием лазерного диода типа *VCSEL* [5] является способ обработки сигнала, основанный на анализе мощности сигнала датчика. Ему свойственно низкое соотношение «сигнал – шум» и высокие технические требования к скорости и разрядности АЦП. Разработанный способ обработки сигнала датчика основан на анализе его временных характеристик, что позволяет снизить стоимость регистратора за счет невысоких технических требований к АЦП.

При обработке данных с датчиков на основе ВБР в качестве основного информационного параметра используется величина изменения центральной длины волны отражения ВБР при внешнем воздействии. Этот параметр может быть рассчитан по построенному спектру различными способами в зависимости от поставленных задач и требований к электронным компонентам. В работе выбран способ оценки центральной длины волны отражения ВБР по полувысоте спектра. Его преимущество в простоте реализации не требующем производительных электронных ресурсов.

Для выявления технических требований, предъявляемых к АЦП, было проведено математическое моделирование предложенного алгоритма обработки сигнала с использованием графической среды программирования *Simulink* в составе программного пакета *MatLab*. Созданная математическая модель позволила оценить величину вносимой в результирующий информационный сигнал ошибки в зависимости от битности АЦП и частоты дискретизации информационного сигнала. Результаты, полученные при использовании метода обработки, заключающегося в расчете центральной длины волны ВБР по полувысоте ее спектра, представлены на рис. 4:

Для выбранного метода минимальная частота дискретизации, при которой величина ошибки не превышает 10 пм, составляет 80 МГц. При этом, как и предполагалось, уменьшение количества бит АЦП до (5 бит) существенно ошибку не увеличивает.

Таким образом, в результате работы выполнены все поставленные задачи:

- проведен анализ существующих методов создания устройств регистрации сигнала волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках;
- создан и исследован метод регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках;

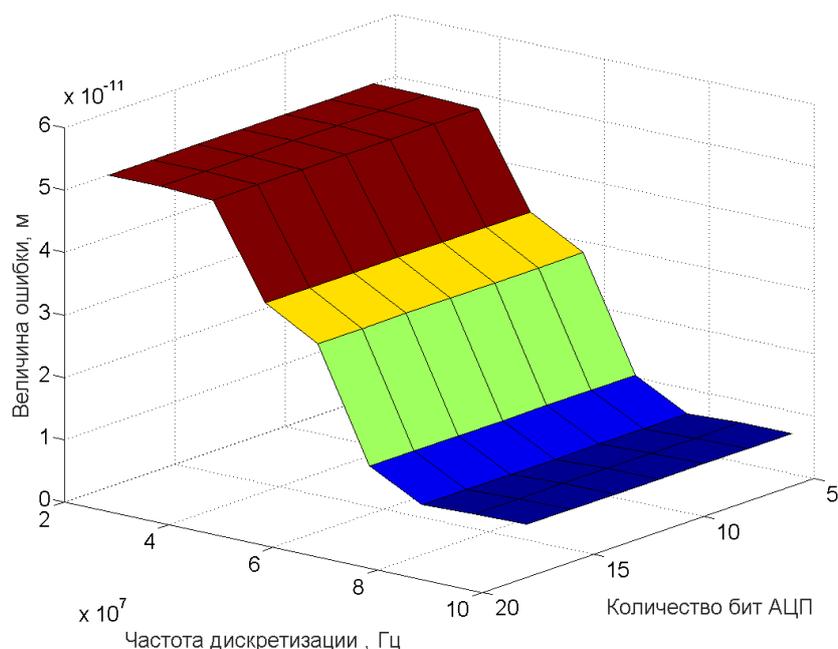


Рис. 4. Величина ошибки определения центральной длины волны отражения ВБР при логарифмической динамике изменения центральной длины волны лазерного диода типа VCSEL

– исследован малогабаритный источник оптического излучения типа VCSEL, позволяющий осуществлять опрос датчиков на ВБР;

– произведено математическое моделирование обработки сигнала устройства регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков в среде *MatLab Simulink*: определена зависимость ошибки метода регистрации спектрального отклика ВБР в зависимости от битности АЦП и частоты дискретизации сигнала;

– создан и исследован макет быстродействующего малогабаритного устройства регистрации сигнала волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках.

В результате оригинальное применение серийного источника излучения VCSEL и разработанный метод модуляции его оптического излучения позволили реализовать макет быстродействующего малогабаритного устройства регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков на основе ВБР, обладающий следующими характеристиками:

- спектральное разрешение не ниже 10 пм;
- частота обновления данных более 500 Гц;
- динамический спектральный диапазон – не менее 3 нм;
- рабочая температура от -20 до +50 °С;
- габаритные размеры 500 x 250 x 50 мм.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные измерения спектрального отклика ВБР при различных температурах.

Как видно из рисунка, сигнал, снятый с макета разработанного устройства регистрации спектрального отклика ВБР, хорошо повторяет сигнал контрольного спектроанализатора.

Устройство регистрации с представленными параметрами может заменить некоторую аппаратуру, производимую в настоящее время за рубежом, технические параметры которой для некоторых применений (в частности, сканируемый спектральный диапазон) являются избыточными.

Разрабатываемый прибор может занять нишу малогабаритных регистраторов сравнительно низкой стоимости, обладающих достаточно высокими спектральным разрешением и частотой опроса и не нуждающихся в дополнительном источнике

оптического излучения. Среди сфер, в которых требуется небольшой диапазон измерений с высокой точностью и важны размеры прибора и возможность его установки на подвижные детали конструкций, можно отметить:

- кораблестроение – контроль целостности лопастей гребного винта;
- машиностроение – диагностика механических напряжений в передаточных валах;
- энергетика – контроль механических напряжений в лопастях ветряных электростанций;
- нефтехимическая промышленность – температурный контроль сооружений.



Рис. 5. Экспериментальные данные измерения спектрального отклика ВБР при температурах 20 °С и 80 °С

Таким образом, результаты проекта могут быть использованы в волоконно-оптических датчиках на ВБР для измерения механического напряжения, вибраций, акустических колебаний, ускорения, давления, температуры в таких отраслях, как строительство, энергетика и машиностроение.

Публикации

1. Погорелая Д.А., Смоловик М.А., Волковский С.А., Михеев М.В., Алейник А.С., Стригалев В.Е. Особенности настройки ПИД-регулятора в цепи обратной связи волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 1 (96). С. 119–127.
2. Мехреньгин М.В., Киреев А.Ю., Погорелая Д.А., Плотников М.Ю., Шуклин Ф.А. Компенсация температурной зависимости выходного сигнала в схеме гомодинного приема сигнала фазовых волоконно-оптических датчиков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 227–233.
3. Патент на изобретение 2548574 Российская Федерация. Способ измерения сигнала волоконно-оптического интерферометрического фазового датчика / И.Г. Дейнека, Д.А. Погорелая, А.С. Алейник, В.Е. Стригалев. Опубл. 20.04.2015.

Литература

1. Cusano A. et al. Fiber Bragg grating sensors: research advancements, industrial applications and market exploitation. 2011. – 322 p.
2. Méndez A. Fiber Bragg grating sensors: a market overview // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6619. P. 661905.
3. Mendoza E.A. et al. Multi-channel monolithic integrated optic fiber Bragg grating sensor interrogator // Photonic Sensors. 2011. Vol. 1. No 3. P. 281–288.
4. Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics // Journal of Lightwave Technology. – 2006. Vol. 24. No 12. P. 4502–4513.
5. Van Hoe B. et al. Low-cost fully integrated fiber Bragg grating interrogation system // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8351. P. 83510U.



Полякова Люсия Александровна
Факультет безопасных информационных технологий
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: lapoliakova@corp.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Л.А. Полякова

Научный руководитель – доцент Г.П. Жигулин

На современном этапе становления общества растет роль информационных ресурсов, информационной инфраструктуры, систем формирования, распространения и применения информации. Под более значимым ресурсом все чаще понимается информация и информационные технологии, участвующие в жизнедеятельности любой организации вне зависимости от ее уровня и ставшие на сегодня одним из главных рыночных продуктов общества. Параллельно процессу масштабной информатизации (автоматизация информационной инфраструктуры, массовое подключение к системам обработки информации к сетям и т. д.) следует усугубление проблемы обеспечения безопасности объектов, содержащих системы и средства обработки и хранения информации.

В последние годы в России наблюдается высокий уровень преступлений, затрагивающих сохранность и безопасность различных объектов и имеющихся на них информационных и материальных ресурсов. Проблема их защиты принципиально важна как для коммерческих, так и для государственных предприятий и ее решение напрямую связано с организацией защитных мероприятий на определенном объекте. Поэтому необходимо стремиться к созданию систем безопасности, при помощи которых возможно комплексно решать вопросы обеспечения информационной безопасности объектов.

В целях создания эффективной системы безопасности на объекте важно проанализировать и правильно оценить угрозы, которым должны противостоять функционирующие системы защиты: контроля и ограничения доступа, охранной и противопожарной сигнализации, видеотелевизионного контроля, защиты информации в автоматизированных системах обработки данных, комплекса организационных мероприятий.

В совокупности все они составляют комплексную систему безопасности, или расширенный набор инженерно-технических средств. Для построения таких систем важно учитывать факторы, влияющие на безопасность объекта, обобщить их, классифицировать, упорядочить процесс формирования исходных данных, позволяющих, с одной стороны, проектировать системы защиты объекта, а с другой – моделировать их работу.

Актуальность проекта заключается в необходимости разработки эффективной системы поддержки принятия решений для осуществления подбора и эффективного размещения инженерно-технических средств безопасности. Подтверждается это следующими фактами:

- отсутствием автоматизированных систем формирования данных, направленных на исключение влияния субъективных факторов и расширенной номенклатуры технических средств в сфере безопасности;
- наличием смысловой неопределенности терминологического и методического аппарата в области проектирования средств физической защиты и, в частности, подсистем обнаружения; недостаточное внимание к обеспечению безопасности компонентов

физической защиты как возможным (промежуточным) объектам воздействия злоумышленников.

Цель проекта – повышение эффективности комплексной безопасности объектов защиты путем рационального подбора и размещения на них инженерно-технических средств безопасности на основе вновь разработанных методов и алгоритмов поддержки принятия решений. Достигается она решением следующих задач:

1. Проведение системного анализа компонентов систем инженерно-технической безопасности объектов, выполнение классификации потенциальных угроз данным компонентам.

2. Определение требований и рекомендаций по повышению защищенности компонентов систем инженерно-технической защиты информации объектов.

3. Разработка методики поддержки принятия решений при подборе технических средств безопасности объектов с заданной спецификацией.

4. Синтез алгоритма эффективного размещения технических средств обнаружения на объекте защиты.

Объект исследования – системы физической защиты объектов информатизации.

Предмет исследования – методы и алгоритмы поддержки принятия решений при проектировании и модернизации систем обеспечения инженерно-технической безопасности объектов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в проекте используются методы системного анализа, теории графов, теории принятия решений, вычислительной математики, методы структурного проектирования.

Научная новизна проекта заключается в следующем.

1. Разработана система классификации угроз определенным компонентам систем физической защиты как потенциальным объектам воздействия.

2. Предложен двухэтапный метод подбора состава инженерно-технических средств обнаружения для объекта защиты, основанный на использовании методов нейронной сети и эмпирических знаний экспертов.

3. Разработан алгоритм эффективного размещения подобранного состава инженерно-технических средств безопасности на объекте защиты, позволяющий учитывать как стоимостные и тактико-технические характеристики средств обнаружения, так и пространственные параметры объектов защиты.

4. Определен алгоритм оценки показателей обнаружительной способности систем физической защиты для локальных зон объектов информатизации с учетом ценности их информационных ресурсов.

Практическая значимость проекта заключается в повышении эффективности инженерно-физической безопасности объектов при использовании созданной системы поддержки принятия решений, позволяющей повысить полноту, точность и достоверность проектных решений при проектировании объектов инженерно-техническими средствами безопасности и включающей:

– базу данных технических средств;

– совокупность программных продуктов, предназначенных для поддержки процесса принятия решений при подборе состава инженерно-технических средств и их эффективном размещении на различных объектах защиты, включая средства графической визуализации.

В процессе работы над проектом, проводятся исследования возможности проектирования компонентов комплексной системы безопасности. Будет разработана электронная система визуального проектирования для расположения предметов в пространстве, позволяющая по исходным данным объекта формировать его виртуальный

образ и размещать технические средства компонентов виртуальной системы комплексной безопасности. Предложен вариант моделирования работы проектируемой системы безопасности с использованием группового метода обработки данных и описана возможность получения статистической оценки ее эффективности. Кроме этого, предложенная технология позволит оценить эффективность уже имеющихся систем безопасности. В работе будет изложена технологическая схема построения системы комплексной безопасности объекта, в том числе:

- разработан алгоритм построения системы безопасности на основе разделения общей системы на подсистемы с последующей формализацией; исследован вариант проектирования системы и размещение инженерно-технических средств защиты с учетом обработки неопределенностей;

- предложена методика улучшения проектных решений, рассмотрена возможность оптимизации затрат при проектировании компонентов системы комплексной безопасности;

- сформулированы требования к экспертной системе, использующей суждения при неопределенных оценках и выраженных лингвистическими переменными;

- показана возможность формализации компонентов защиты и математическое обоснование функций защиты;

Основным результатом проекта является разработка системы поддержки принятия решений при подборе и размещении состава инженерно-технических средств безопасности объектов.

Публикации

1. Полякова Л.А., Латышева Л.А. Определение видов нарушений целостности системы управления информационной безопасностью на основе классификации угроз // [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2890/2890.pdf> (дата обращения: 19.02.2018).

2. Полякова Л.А., Андрус М.О. Оценка возможностей нарушителей по реализации угроз безопасности информации в зависимости от прав доступа // Проблема комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур: Межвузовский сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции КОНФИБ'16. СПб., 2017. С. 45–47

3. Полякова Л.А. Построение эффективной системы управления информационной безопасностью компании на основе бизнес-процесса // [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2891/2891.pdf> (дата обращения: 19.02.2018).

4. Полякова Л.А. Построение системы обеспечения информационной безопасности в соответствии с требованиями Положения Банка России № 382-П [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1046/1046.pdf> (дата обращения: 19.02.2018).

5. Полякова Л.А., Поляков Р.А. Логико-вероятностный подход к формированию алгоритма анализа методов моделирования системы защиты объекта // Проблема комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур: Межвузовский сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции КОНФИБ'16. СПб., 2017. С. 30–32

6. Полякова Л.А., Латышева А.В. Итеративная модель разработки автоматизированной системы // Проблема комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур: Межвузовский сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции КОНФИБ'16. СПб., 2017. С. 113–115.

7. Полякова Л.А. Использование принципов системного анализа на этапе проектирования системы информационной безопасности // Актуальные проблемы военной науки и политехнического образования ВМФ. СПб., 2016. С. 274–280.
8. Полякова Л.А., Поляков Р.А. Система безопасности предприятия – методология решения проблемы // Проблема комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур: Межвузовский сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции КОНФИБ'16. СПб., 2017. С. 96–97.
9. Полякова Л.А., Жигулин Г.П. Методы построения эффективной системы информационной безопасности // Проблема комплексного обеспечения информационной безопасности и совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов силовых структур: Межвузовский сборник трудов VI Всероссийской научно-технической конференции КОНФИБ'15. СПб., 2016. С. 100–102.
10. Полякова Л.А., Андрус М.О. Метод построения системы управления информационной безопасностью на основе оценки рисков [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016.
URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2891/2891.pdf> (дата обращения: 19.02.2018).
11. Полякова Л.А. Принципы системного анализа при проектировании системы информационной безопасности // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 3. С. 122–125.



Резник Иван Алексеевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: ivanreznik1993@mail.ru

СЕНСОРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОПЛАСТИН И НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА

И.А. Резник

Научный руководитель – доцент А.О. Орлова

Цели работы – создание электрического сенсора на парах азотосодержащих соединений на основе гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен» и выявление закономерностей дезактивации возбужденного состояния полупроводниковых квантовых нанопластин в составе гибридных структур с графеном.

В ходе выполнения проекта были сформированы гибридные структуры путем послойного нанесения полупроводниковых нанопластин и графена на диэлектрическую подложку с металлическими контактами методом Ленгмюра – Блоджетт [1]. Он заключается в формировании монослоев наноструктурированного материала на поверхности воды и переносе их на требуемую поверхность. Принципиальная схема процесса приведена на рис. 1.

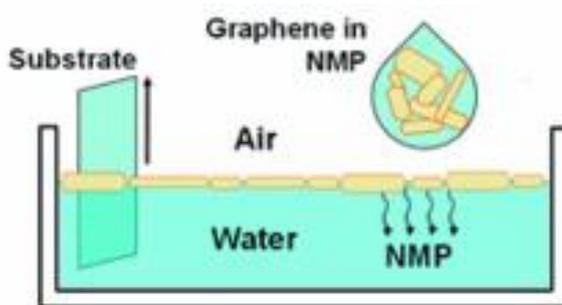


Рис. 1. Схематическое представление формирования и нанесения монослоев графена методом Ленгмюра – Блоджетт [2]

Благодаря точному контролю сил поверхностного натяжения получаемой пленки и площади, которую она занимает, методика Ленгмюра – Блоджетт позволяет формировать монослои с плотной упаковкой частиц. Пленки были сформированы в твердой фазе и перенесены на подложку при силе поверхностного натяжения 34, 32 и 38 мН/м для графена и нанопластинок с латеральными размерами 20 и 300 нм соответственно.

Исследование морфологии полученных тонких пленок на диэлектрической подложке было проведено на лазерном конфокальном сканирующем микроскопе *LSM-710 (Zeiss)*. На рис. 2 представлены изображения с конфокального микроскопа полученных тонких пленок образцов гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен».

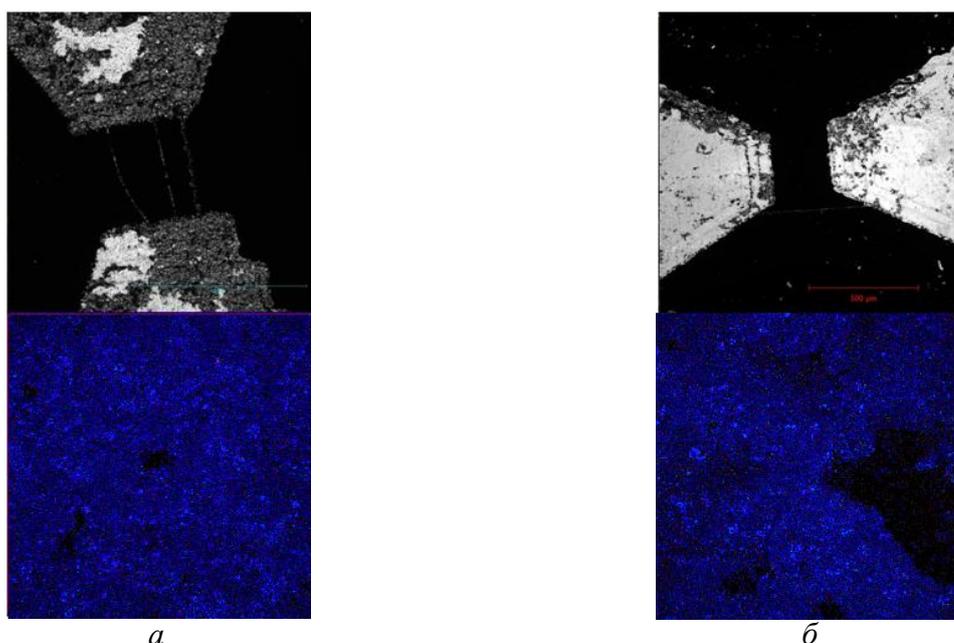


Рис. 2. Гибридные структуры на основе графена и нанопластинок, снятые в режиме пропускания (сверху) и в люминесцентном при возбуждении на длине волны 405 нм с латеральными размерами: а – 300 нм; б – 20 нм

Из рис. 2 видно, что гибридные структуры «полупроводниковые нанопластины/графен» сформировались в области зазора между титановыми контактами, что позволило провести исследования их фотоэлектрических свойств.

На рис. 3 приведены спектры интенсивности люминесценции и кинетика затухания люминесценции нанопластинок с латеральными размерами 20 и 300 нм (красная и синяя кривая соответственно) в составе гибридных структур с графеном. Кинетика затухания люминесценции полученных образцов была получена при помощи флуоресцентного микроскопа с приставкой для коррелированного счета одиночных фотонов *MicroTime 100 (PicoQuant)*.

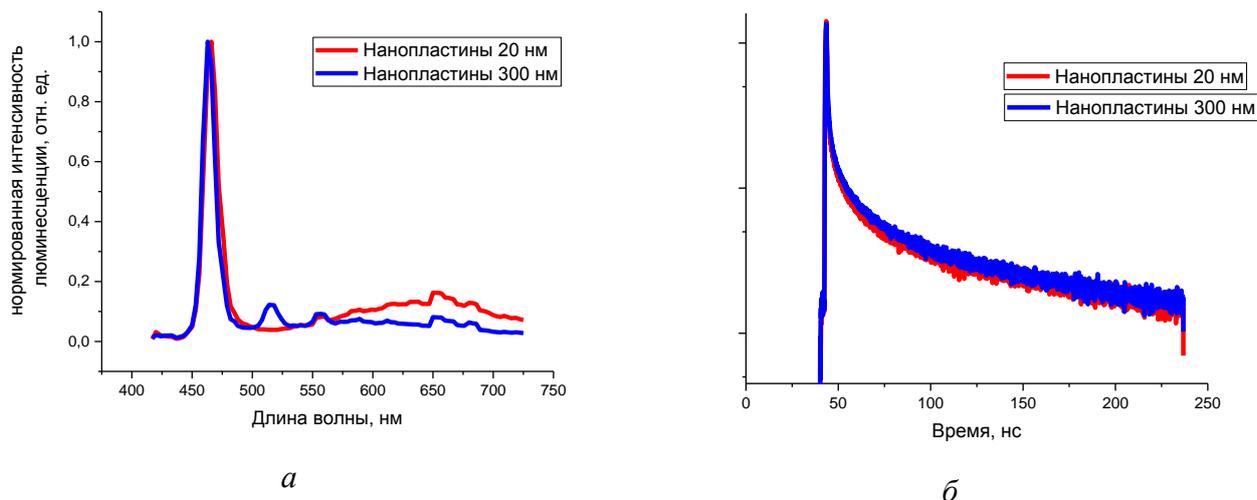


Рис. 3. а – спектры люминесценции; б – кривые ее затухания для полупроводниковых нанопластин в составе гибридных структур с графеном при возбуждении светом с длиной волны 405 нм

Дополнительные полосы люминесценции на рис. 3а, наблюдаемые у нанопластин с латеральными размерами 300 нм, обусловлены формированием побочных ансамблей нанопластин при их синтезе [3]. Широкая полоса люминесценции в красной области спектра отвечает за дефектную люминесценцию, вызванную большим количеством не пассивированных дефектов на поверхности нанопластин, играющих роль эффективного канала релаксации их фотовозбужденного состояния [4].

Измерение электрических свойств проводилось при помощи программно-аппаратного комплекса созданного на базе пикоамперметра *Keythley 2636B* и синхронизированных с ним внешних источников излучения. Комплекс позволяет снимать данные о фото- и темновой проводимости гибридной наноструктуры с достаточно высоким разрешением по времени (до 16 мс), что дает возможность проводить анализ быстропротекающих процессов переноса заряда в гибридной структуре (рис. 4).

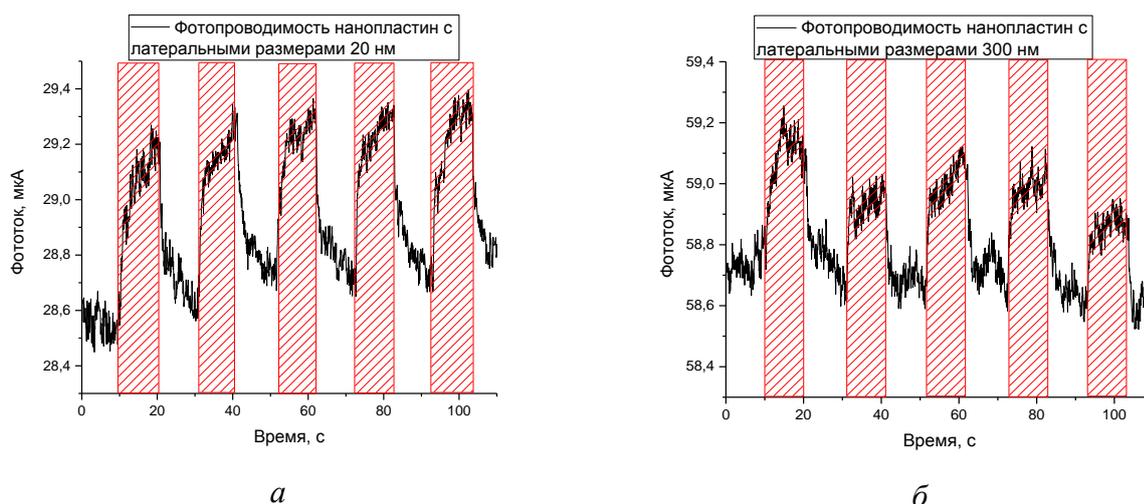


Рис. 4. Фотопроводимость гибридных структур нанопластин с латеральными размерами: а – 20; б – 300 нм при возбуждении их светом на длине волны 405 нм (заштрихованная область)

Очевидно, что полученные гибридные структуры обладают фотопроводимостью, то есть существует эффективный канал переноса фотосгенерированных носителей заряда от

нанопластин к графену [5]. При этом нанопластинам с меньшими латеральными размерами (20 нм) соответствует большая амплитуда фотоотклика, чем с большими (300 нм), что можно объяснить большей поверхностной концентрацией нанокристаллов, приходящихся на один графен.

Для исследования влияния паров аммиака на фотопроводимость гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен» образец с гибридными структурами помещался в герметичную камеру, к которой обеспечивалась контролируемая подача воздуха, содержащего пары аммиака. На рис. 5 приведено схематичное изображение установки для контролируемой подачи/откачивания паров аммиака.

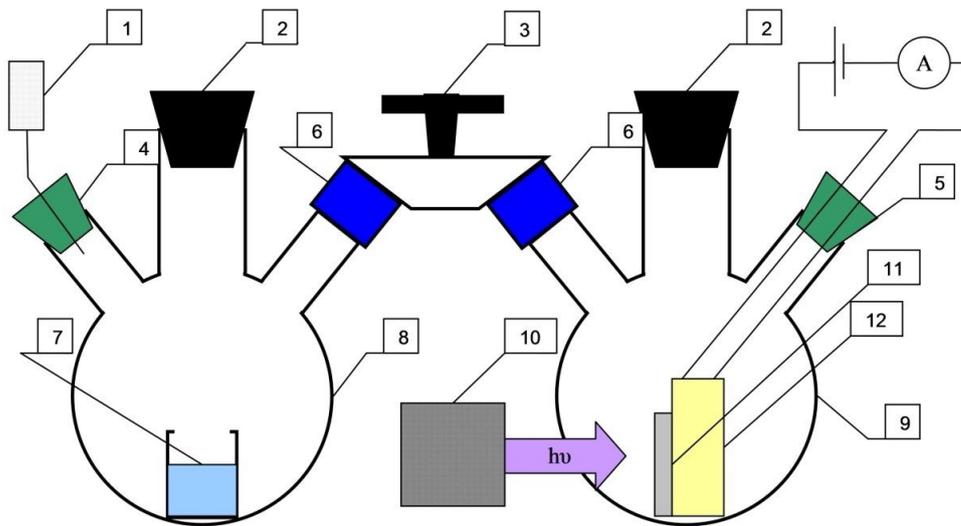


Рис. 5. Схематическое изображение стенда для исследования влияния паров аммиака на фотоэлектрические свойства гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен»

Сенсор (11) закрепляется на держателе (12) в герметичной камере (9), освещение его осуществляется источником (10). Камера (9) посредством герметичных соединительных шлангов соединена с камерой (8). В эту камеру через отверстие, закрываемое пробкой (2), помещается водный раствор аммиака (7). С помощью вентиля 3 регулируется подача паров гидразина в камеру (9). Изменение проводимости сенсора в присутствии паров гидразина регистрируется с помощью программно-аппаратного комплекса на основе пикоамперметра *Keithley 2636B*, который подключен к сенсору через контакты, выведенные из камеры (9) через герметичную пробку (5). Прокачка системы воздухом для удаления паров гидразина осуществляется при открытом вентиле (3) с использованием насоса (1), который соединен с камерой (8) через герметичную пробку (4), снабженную клапаном для подачи воздуха.

Адсорбция молекул аналита на поверхности нанопластин вызывает сильное снижение квантового выхода люминесценции нанопластин, что является следствием перераспределения эффективностей каналов релаксации фотовозбужденного состояния нанокристаллов [6]. В рамках выполнения проекта были исследованы зависимости люминесцентных и фотоэлектрических свойств гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен» от концентрации паров аммиака в воздухе. На рис. 6 представлены данные фотопроводимости, интенсивности и кинетики люминесценции до и после экспозиции образцов гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен» парами аммиака.

Из рис. 6 видно, что образцы гибридных структур на основе нанопластин с латеральными размерами 300 нм более активно реагируют на присутствие молекул аммиака. Такое поведение можно объяснить гораздо большей площадью их поверхности, что

приводит к большему количеству посадочных мест для молекул аммиака и, как следствие, к более эффективному тушению люминесценции и фотопереносу носителей заряда на графен.

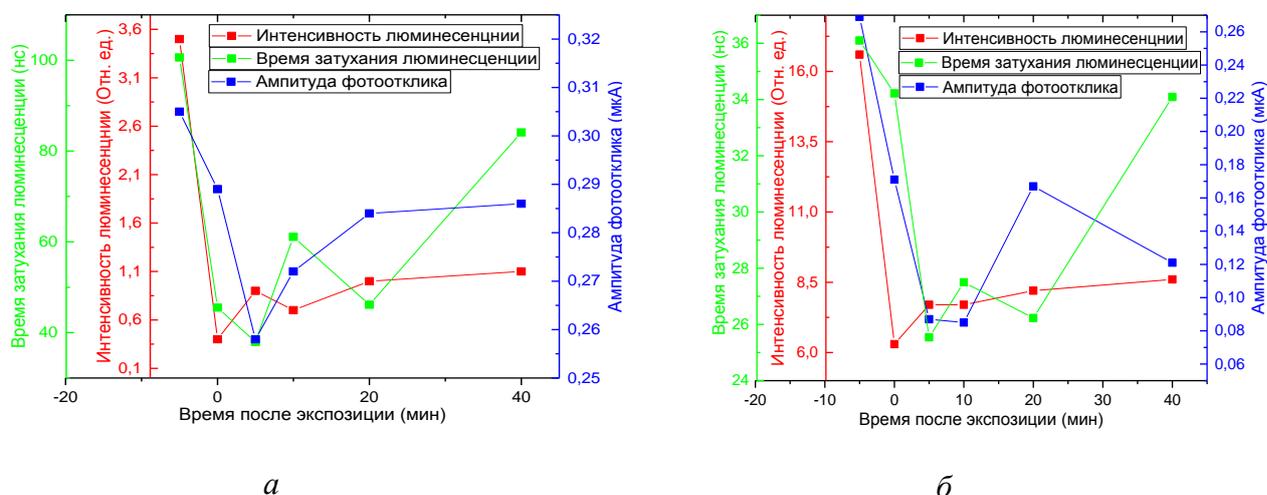


Рис. 6. Люминесцентные и фотоэлектрические свойства гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен» в зависимости от концентрации паров аммиака: а – нанопластины 20 нм; б – нанопластины 300 нм

Заключение

В рамках выполнения проекта были исследованы закономерности изменения люминесцентных и фотоэлектрических свойств двумерных гибридных структур на основе полупроводниковых нанопластин и графена в зависимости от латеральных размеров нанопластин. Для выполнения поставленной цели были сформулированы и выполнены следующие задачи:

- разработаны методики формирования гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен» на основе полупроводниковых нанопластин с различными латеральными размерами;
- разработан и собран стенд для исследования влияния паров аммиака на фотоэлектрические свойства гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен»;
- установлены зависимости люминесцентных и фотоэлектрических свойств структур «полупроводниковые нанопластины/графен» от латеральных размеров нанопластин.

Исследование люминесцентных и фотоэлектрических свойств двумерных гибридных наноструктур «полупроводниковые нанопластины/графен» показало их симбатное изменение под воздействием паров аммиака. При этом анализ эффективностей процессов безызлучательных релаксаций фотовозбужденного состояния полупроводниковых нанопластин в гибридных структурах с графеном подтвердил, что нанопластины с большими латеральными размерами более чувствительны к присутствию паров аммиака в атмосфере воздуха.

Результаты выполнения проекта могут быть применены для создания новых эффективных газоанализаторов на основе двумерных гибридных структур «полупроводниковые нанопластины/графен».

Публикации

1. Gromova Y.A., Vovk I.A., Reznik I.A. Photoinduced conductivity enhancement in quantum dot/multilayer graphene nanostructures // MRS Online Proceedings Library Archive. 2015. Vol. 1787. P. 15–19.

2. Gromova Y.A., Reznik I.A., Vovk I.A. Energy transfer in quantum dots/multilayer graphene nanostructures // *Advanced Carbon Nanostructures*. 2015. Books of Abstracts. P. 19.
3. Reznik I.A., Gromova Y.A., Zlatov A.S., Baranov M.A., Orlova A.O., Moshkalev S.A., Maslov V.G., Baranov A.V., Fedorov A.V. Influence of the QD luminescence quantum yield on photocurrent in QD/graphene hybrid structures // *Proceedings of SPIE*. 2016. Vol. 9884. P. 98843A.
4. Reznik I.A., Gromova Y.A., Zlatov A.S., Baranov M.A., Orlova A.O., Moshkalev S.A., Maslov V.G., Baranov A.V., Fedorov A.V. Hybrid structures based on quantum dots and graphene nanobelts // *Optics and Spectroscopy*. 2017. Vol. 122. No 1. P. 114–119.

Литература

1. Alaferdov A.V. *et al.* Formation of thin, flexible, conducting films composed of multilayer graphene // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2014. Vol. 78. No 12. P. 1357–1361.
2. Kim H.K. *et al.* Optoelectronic properties of graphene thin films deposited by a Langmuir – Blodgett assembly // *Nanoscale*. 2013. Vol. 5. No 24. P. 12365–12374.
3. Bouet C. *et al.* Two-dimensional growth of CdSe nanocrystals, from nanoplatelets to nanosheets // *Chemistry of Materials*. 2013. Vol. 25. No 4. P. 639–645.
4. Kunneman L.T. *et al.* Nature and decay pathways of photoexcited states in CdSe and CdSe/CdS nanoplatelets // *Nano Letters*. 2014. Vol. 14. No 12. P. 7039–7045.
5. Konstantatos G. *et al.* Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain // *Nature Nanotechnology*. 2012. Vol. 7. No 6. P. 363–368.
6. Orlova A.O. *et al.* Reversible photoluminescence quenching of CdSe/ZnS quantum dots embedded in porous glass by ammonia vapor // *Nanotechnology*. 2013. Vol. 24. No 33. P. 335701.



Семакова Анна Александровна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра высокопроизводительных вычислений
E-mail: a.a.semakova@gmail.com

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ НАЗНАЧЕНИИ МЕДИКАМЕНТОЗНОЙ ТЕРАПИИ

А.А. Семакова

Научный руководитель – доктор технических наук А.В. Бухановский

Цели проекта – разработка и развитие методологических основ для построения интегрированной модели поддержки принятия клинических решений при назначении медикаментозной антигипертензивной (АГП) терапии, которая позволила бы повысить эффективность и качество оказания медицинской помощи.

Взаимосвязанными задачами, обеспечивающими реализацию поставленной цели, являются:

– исследование и интеллектуальный анализ данных (методами *text-data mining*) электронных медицинских карт (ЭМК) пациентов с диагнозом артериальная гипертензия

(АГ), хранящихся в медицинской информационной системе (МИС), с целью идентификации ковариационных зависимостей между индивидуальными особенностями пациентов и исходом терапии;

– разработка интегрированной модели для выработки персонализированных рекомендаций по стратегии пожизненного лечения пациентов, страдающих АГ, на основе методов вероятностного моделирования на данных (*Data-Driven Modelling, DDM*);

– валидация построенной модели с оценкой метрических показателей качества предсказательных моделей.

Переход от доказательной медицины к персонализированной в рамках парадигмы P4-медицины (*predictive* – предсказательная, *preventive* – превентивная (профилактическая), *personalized* – персонализированная и *participatory* – партисипативная (партнерская)) обуславливает тенденцию развития предсказательных методов и моделей в медицине и здравоохранении. Традиционные методы диагностики и лечения любого заболевания регламентируются стандартами, протоколами ведения больных с конкретной нозологией и клиническими рекомендациями, которые разрабатываются на основе имеющихся доказательных данных о пользе и рисках применения лекарственного препарата или медицинского вмешательства. Однако имеющиеся доказательные данные ограничены, а их использование на практике не соответствует ожидаемому и реальному эффектам внедрения [1]. Кроме того существуют серьезные различия в выборе медицинского вмешательства не только на уровне конкретных врачей, но и на уровне учреждений города, области, региона, страны, что не учитывается в рекомендациях и может быть обусловлено эндогенными (например, генетическая особенность популяции) и экзогенными (например, климат) факторами. В связи с этим эффективность и безопасность медицинского вмешательства в реальной жизни может серьезно отличаться от ожидаемой по результатам клинических исследований, и при одной и той же нозологии одинаковый вид вмешательства может оказаться эффективным для одного пациента и потенциально опасным для другого. В связи с этим актуален вопрос идентификации ковариационных зависимостей между индивидуальными особенностями пациентов и исходом терапии. Как следствие, возникает необходимость в модификации клинических рекомендаций посредством разработки персонализированных правил лечения с учетом индивидуальных характеристик пациента.

В настоящее время существуют разные методы моделирования клинической медикаментозной терапии, направленные на разработку персонализированных стратегий лечения определенных нозологий [2–5]. При этом существующие решения ограничены в первую очередь данными клинических испытаний, которые имеют априорные критерии для отбора пациентов и проводятся в условиях контроля пациентов со стороны экспертов, а также сравнительно малым количеством альтернативных видов лечения. Интеллектуальный анализ и предсказательное моделирование на данных ЭМК пациентов предоставляют возможность для получения и формализации дополнительных знаний об эффектах медицинских вмешательств, проводимых в реальной клинической практике, и позволяют повысить эффективность и качество оказания медицинской помощи.

В качестве апробации теоретических и экспериментальных исследований данного научно-технического проекта выбраны клинические данные ЭМК пациентов, страдающих АГ и обратившихся в ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Минздрава России в интервале с 2010-го по 2015 год по причине повышения уровня артериального давления (АД). Выбор именно данной нозологии обоснован следующими причинами:

– высокая степень распространенности: по данным ВОЗ, 40 % населения РФ страдает АГ, а среди больных кардиологической патологией 80 % составляют пациенты с диагнозом АГ;

– АГ предусматривает пожизненную терапию с доступными результатами краткосрочных исследований на «рафинированных» популяциях плохо экстраполируемых на рутинную клиническую практику и большое количество возможных вариантов лечения без четких различий в эффективности;

– большая нагрузка на систему здравоохранения, связанная с неудовлетворительными результатами лечения: в ранее проведенных исследованиях [6] доказывается, что не более 43 % пациентов первоначально получают эффективную для них АГП-монотерапию (вид терапии, при котором пациенту назначается только один класс препаратов из возможных рекомендованных классов).

Математическая формализация объекта

Положим, пусть $X_j(t_i) = \{x_j^1(t_i), \dots, x_j^m(t_i)\}$, $j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, n$ – множество возможных характеристик объекта (пациента) $X_j(t_i)$ в момент времени t_i , где k – количество пациентов, n – временная точка, m – число характеристик пациента. Множество медикаментозной АГП-терапии, назначенной пациенту $X_j(t_i)$ в момент времени t_i , обозначим $Y_j(X_j(t_i)) = \{y_j^1, \dots, y_j^l\}$, где l – количество назначенных препаратов.

Цель задачи заключается в прогнозировании для пациента эффективной АГП-терапии по имеющимся у него в определенный момент времени характеристикам:

$$f: x_j^1(t_i) \times \dots \times x_j^m(t_i) \rightarrow \{y_j^1, \dots, y_j^l\} \quad (1)$$

Введем критерий эффективности назначенной АГП-терапии – максимизация вероятности достижения целевого уровня АД на фоне приема АГП-препаратов:

$$P[x_j^s(t_{i+1}) < 140, x_j^d(t_{i+1}) < 90] \rightarrow \max. \quad (2)$$

а также ограничения на уровень АД и временной интервал между приемами у специалиста:

$$\begin{cases} x_j^s(t_i) \geq 140, \\ x_j^d(t_i) \geq 90, \\ t_{i+1} - t_i > 28, \end{cases} \quad (3)$$

где $x_j^s(t_i)$ и $x_j^d(t_i)$ – уровни систолического и диастолического АД объекта (пациента) $X_j(t_i)$ в момент времени t_i , соответственно.

Критерий эффективности назначенной АГП-терапии (2) и ограничения (3) построены на клинических предпосылках задачи, а именно:

– все объекты (пациенты) – больные АГ, значит, уровень систолического АД у них ≥ 140 мм рт. ст. и/или уровень диастолического АД ≥ 90 мм рт. ст.;

– АГП-препараты обладают свойством «накопления», таким образом, эффект их действия измеряется после месячного курса лечения (28 календарных дней);

– клиническим критерием эффективности АГП-терапии является достижение целевого уровня АД: уровень систолического АД < 140 мм рт. ст. и уровень диастолического АД < 90 мм рт. ст.

Классификация пациентов по исходам медикаментозной терапии

Преобразуем разработку персонализированных рекомендаций по стратегии пожизненного лечения пациентов, страдающих АГ, в задачу классификации. Положим, пусть X – множество возможных признаков x^i , $i = 1, \dots, n$, объекта (пациента). Цель задачи классификации заключается в построении классификатора:

$$f: x^1 \times \dots \times x^n \rightarrow \{y_1, \dots, y_l\},$$

минимизирующего функцию потерь $E(f, y, x^i) = \sum_{k=1}^s \|f_k - y_k\|^2 \rightarrow \min$, где s – количество образцов в тестовой выборке.

Классификатор f моделируется на основе обучающей выборки $T \subset x^1 \times \dots \times x^n \times \{y_1, \dots, y_l\}$, которая состоит из m элементов:

$$t_j = (v_j, y_j) = (v_j^1, \dots, v_j^n, y_j), j = 1, \dots, m,$$

где $v_j^i \in x^i$ – значения признака x^i для объекта t_j ; $y_j \in \{y_1, \dots, y_l\}$ – класс объекта t_j .

Класс объекта t_j обучающей выборки T определен следующим образом:

$$y_j = \begin{cases} 1, & t_j \in [v_j^s < 140 \cap v_j^d < 90] \\ 0, & t_j \in [v_j^s \geq 140 \cup v_j^d \geq 90] \end{cases} j = 1, \dots, m,$$

где v_j^s и v_j^d – уровни систолического и диастолического АД объекта (пациента) t_j соответственно.

Таким образом, для каждого класса АГП-препарата необходимо построить классификатор, прогнозирующий его эффективность (метка класса: 1) или неэффективность (метка класса: 0) для пациента по имеющимся до начала терапии его базовым характеристикам, а именно: уровню АД, полу, возрасту, индексу массы тела (ИТМ), наследственности, данным о вредных привычках (таких как курение) и некоторых сопутствующих заболеваниях (дислипидемии, сахарном диабете, нарушении толерантности к глюкозе, гипертрофии левого желудочка, микроальбуминурии, хронической болезни почек, хронической сердечной недостаточности (ХСН) и ишемической болезни сердца).

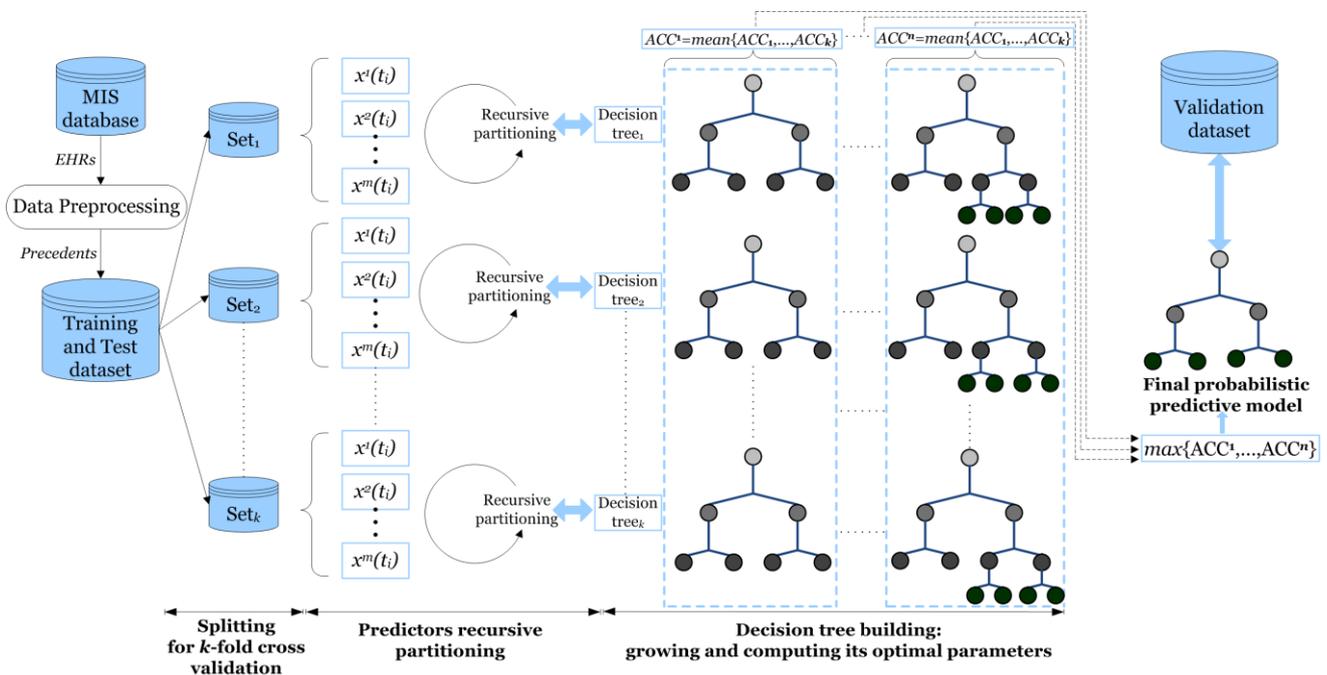


Рис. 1. Поточковая архитектура модели

На текущем этапе работ в качестве первичного эксперимента построена концептуальная стратегия прогнозирования индивидуальной АГП-монотерапии. Были рассмотрены ретроспективные данные ЭМК пациентов с основным диагнозом АГ, а значит, лечение должно начинаться именно с монотерапии АГП-препаратом в силу того, что резкое снижение АД может привести к риску сердечно-сосудистых осложнений. Согласно

рекомендациям европейского кардиологического сообщества (*European Society of Cardiology/European Society of Hypertension, ESH/ESC*), лечение допустимо начать с одного из пяти классов АГП-препаратов (бета-блокаторы, ингибиторы ангиотензинпревращающего фермента (АПФ), антагонисты рецепторов к ангиотензину II, антагонисты кальция, диуретики). С целью выявления эффективных персонализированных АГП-правил лечения для каждого рекомендованного класса АГП-препаратов были построены деревья решений посредством адаптации *CART*-алгоритма к исследуемым данным о пациентах. Поточковая архитектура полученных моделей представлена на рис. 1.

Настройка оптимальных параметров деревьев решений проводилась на основе максимизации показателя доли верно классифицированных объектов (*accuracy*) на тестовой выборке. Качество работы модели характеризуется чувствительностью (*sensitivity*) и специфичностью (*specificity*) алгоритма классификации, вычисленными на валидационной выборке. Достигнутые значения этих показателей представлены в Таблице.

Таблица

Метрические показатели построенных деревьев решений

Оптимальная глубина дерева; метрики качества	Бета-блокаторы	Ингибиторы АПФ	Антагонисты рецепторов к ангиотензину II	Антагонисты кальция	Диуретики
Применение индекса Gini в качестве критерия разделения предикторов					
Глубина дерева	4	4	4	4	5
<i>Accuracy</i>	0,63	0,58	0,59	0,56	0,5
<i>Sensitivity</i>	0,62	0,12	0,19	0,33	0,25
<i>Specificity</i>	0,56	0,9	0,92	0,71	0,6
Применение энтропийного критерия разделения предикторов					
Глубина дерева	8	8	7	8	5
<i>Accuracy</i>	0,59	0,61	0,61	0,51	0,5
<i>Sensitivity</i>	0,46	0,59	0,3	0,33	0,5
<i>Specificity</i>	0,75	0,56	0,85	0,52	0,4

Представленные в таблице высокие значения специфичности показывают сильную способность построенных деревьев решений идентифицировать неэффективную терапию, однако, низкие значения чувствительности означают, что классификаторы слабо определяют эффективное лечение. Дальнейшее развитие и расширение исследования направлено на калибровку моделей с целью повышения показателей чувствительности.

В качестве иллюстрации ковариационной структуры модели на рис. 2 продемонстрировано четырехуровневое дерево решений, определяющее вероятностный сценарий назначения эффективной и неэффективной монотерапии бета-блокаторами. Наиболее значимыми характеристиками пациента, влияющими на эффективность АГП-терапии, являются уровень систолического АД (индекс *Gini* = 0,36), возраст (индекс *Gini* = 0,29), ИМТ (индекс *Gini* = 0,18), наследственность (индекс *Gini* = 0,05), дислипидемия (индекс *Gini* = 0,08), ХСН (индекс *Gini* = 0,04).

Результаты научно-технического проекта могут быть использованы в качестве рекомендательного модуля, который послужит ядром персонализированной системы поддержки принятия решений при назначении клинической терапии. Разработанная модель идентификации персонализированной АГП-монотерапии позволит повысить правильность решений, осуществляемых сотрудниками медицинских учреждений при амбулаторном приеме пациентов, и увеличить эффективность лечения больных. Врач-кардиолог получит возможность оценить предложенный системой сценарий по стратегии пожизненного лечения пациентов, страдающих АГ, а потом – согласиться с ним или нет.

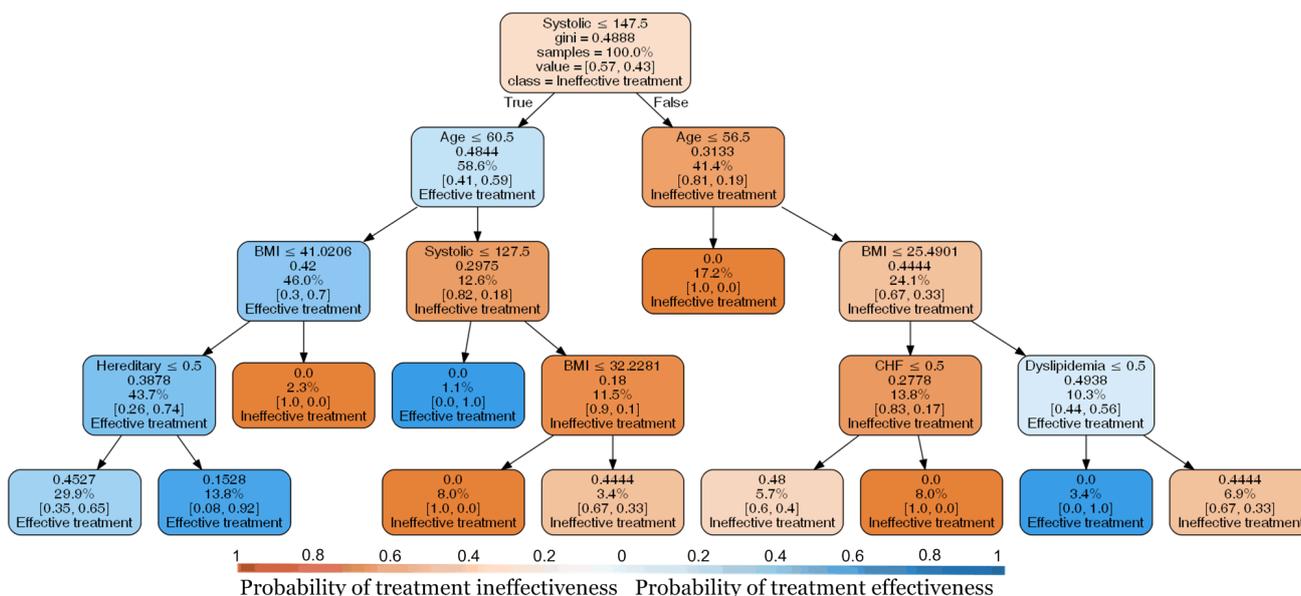


Рис. 2. Ковариационная структура дерева решений, определяющего эффективность монотерапии бета-блокаторами

Публикации

1. Semakova A.A., Zvartau N.E., Bolgova E.V., Konradi A.O. Quality of hypertensive patients' electronic health records in specialized cardiological centre: 6-year trends // Digital Transformation and Global Society. DTGS 2016. Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 674. P. 544–552.
2. Semakova A.A., Zvartau N.E., Bochenina K.O., Konradi A.O. Towards identifying of effective personalized antihypertensive treatment rules from electronic health records data using classification methods: initial model // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 121. P. 852–858.
3. Zvartau N.E., Krikunov A.V., Semakova A.A., Bolgova E.V., Kovalchuk S.V., Boukhanovsky A.V., Konradi A.O. Prevalence of diabetes and lipid disorders in hypertension patients referred to specialized cardiological centre: five-years trends // Journal of Hypertension. 2016. Vol. 34. P. e322–e323.
4. Zvartau N.E., Krikunov A.V., Semakova A.A., Bolgova E.V., Kovalchuk S.V., Boukhanovsky A.V., Konradi A.O. Five-year trends in specific risk factors in hypertensive patients referred to specialized cardiological centre // European Heart Journal. 2016. Vol. 37. P. 66–67.
5. Zvartau N.E., Krikunov A.V., Semakova A.A., Bolgova E.V., Kovalchuk S.V., Boukhanovsky A.V., Konradi A.O. Five-years trends in demographic characteristics of hypertensive patients referred to specialized cardiological centre: age and gender // Journal of Hypertension. 2016. Vol. 34. P. e62.
6. Zvartau N.E., Krikunov A.V., Semakova A.A., Bolgova E.V., Kovalchuk S.V., Boukhanovsky A.V., Konradi A.O. Antihypertensive treatment in routine clinical practice of specialized cardiological centre: six-year trends // Journal of Hypertension. 2017. Vol. 35. P. e93.
7. Zvartau N.E., Krikunov A.V., Semakova A.A., Bolgova E.V., Kovalchuk S.V., Boukhanovsky A.V., Konradi A.O. Six-year trends in antihypertensive monotherapy and blood pressure control in patients referred to specialized cardiological centre // Journal of Hypertension. 2017. Vol. 35. P. e102.
8. Zvartau N.E., Krikunov A.V., Semakova A.A., Bolgova E.V., Kovalchuk S.V., Boukhanovsky A.V., Konradi A.O. Six-year trends in antihypertensive monotherapy: focus on blood pressure control and originals/generics ratio // European Heart Journal. 2017. Vol. 38. No suppl_1. P. 1653.

Литература

1. Tinetti M.E., Studenski S.A. Comparative effectiveness research and patients with multiple chronic conditions // New England Journal of Medicine. 2011. Vol. 364. No 26. P. 2478–2481.

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

2. Zhang B. et al. A robust method for estimating optimal treatment regimes // *Biometrics*. 2012. Vol. 68. No 4. P. 1010–1018.
3. Foster J.C. et al. Simple subgroup approximations to optimal treatment regimes from randomized clinical trial data // *Biostatistics*. 2014. Vol. 16. No 2. P. 368–382.
4. Laber E.B., Zhao Y.Q. Tree-based methods for individualized treatment regimes // *Biometrika*. 2015. Vol. 102. No 3. P. 501–514.
5. Zhao Y. et al. Estimating individualized treatment rules using outcome weighted learning // *Journal of the American Statistical Association*. 2012. Vol. 107. No 499. P. 1106–1118.
6. Zwartau N.E. et al. Six-year trends in antihypertensive monotherapy and blood pressure control in patients referred to specialized cardiological centre // *Journal of Hypertension*. 2017. Vol. 35. P. e102.



Смирнов Андрей Ильич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: icar08@yandex.ru

РАЗРАБОТКА РОБАСТНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ОБЪЕКТА, УСТАНОВЛЕННОГО НА НЕЖЕСТКОМ ОСНОВАНИИ

А.И. Смирнов

Научный руководитель – доцент В.И. Бойков

Исследуется проблема построения робастных алгоритмов управления динамическими объектами, расположенными на нежестком основании. Предложен новый способ реализации эталонной модели, структура которой включает в себя как явную, так и неявную части, что позволяет получить желаемую динамику системы. Пьезодвигатели работают на основе обратного пьезоэффекта, при котором перемещение исполнительного пьезоэлемента достигается за счет его деформации при приложении внешнего электрического напряжения [1].

Исследователи почти не уделяли внимания вопросу управления прецизионными микроперемещениями в условиях, когда исполнительное устройство располагается на недостаточно жестком или подвижном основании. Из-за низкой инерционности пьезоматериалов актюаторы успевают реагировать на импульсы управления, вследствие чего выходное состояние системы также носит пульсирующий характер [1, 2].

Робастный алгоритм управления стационарными объектами при наличии нежесткого основания обеспечивает слежение за выходом объекта с гладким ограниченным эталонным сигналом, с заданной разработчиком точностью и за конечное время

Объектами исследования являются элементы, устройства, части образцов информационно-измерительных и управляющих систем для прецизионного позиционирования с использованием пьезодвигателей, пьезоактюаторов, датчиков микро- и наноперемещений.

Цель проекта – снижение отрицательного влияния динамики опоры на качество работы системы управления.

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

Алгоритм синтеза управления пьезопроводом, установленным на нежестком основании

Для реализации алгоритма необходимо выполнить следующие операции.

1. Задать требования к системе в переходном и установившемся режимах.
2. Задать модель исходного объекта в виде:

$$\dot{x}(t) = [A]x(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t), \quad \varepsilon = g(t) - y(t), \quad (1)$$

где x, u, y, g, ε – векторы состояния, управления, выхода, внешнего воздействия и ошибки слежения соответственно; $[A] = A_0 + [\Delta A], B, C$ – интервальная матрица состояния с медианной A_0 и интервальной $[\Delta A]$ составляющими, матрицы управления и выхода соответственно [3]. Перечисленные компоненты имеют размерности:

$$\begin{aligned} \dim(x) = n, \quad \dim(u) = r, \quad \dim(y) = \dim(g) = \dim(\varepsilon) = m \\ \dim[A] = n \times n \quad \dim[B] = n \times r \quad \dim[C] = m \times n \end{aligned}$$

3. Если $r = m = 1$, сформировать модель, задав ее с помощью передаточной функции «ВХОД – ВЫХОД»:

$$\Phi(s_0, \omega_0) = \frac{v_n \omega_0^n}{s^n + \sum_{i=1}^n v_i \omega_0^i s^{n-1}}, \quad (2)$$

где коэффициенты v_i характеристического полинома определяют положение его корней на комплексной плоскости; ω_0 – характеристическая частота.

4. Определить значение частоты ω_0 из условия:

$$\omega_0 = \max\{\omega_0 = \arg(t_{II}(\omega_0) \leq t_{III}), \quad \omega_0 = \arg(D(\omega_0) \geq D_V), \quad \omega_0 = \arg(\delta(\omega_0) \leq \delta_r)\}, \quad (3)$$

где t_{II} – реальное время переходного процесса, t_{III}, D_V, δ_r – требуемые значения длительности переходного процесса, добротности по скорости и величины относительной частотной ошибки соответственно.

5. Провести полное комплексное исследование спроектированной системы в оболочке *MatLab* и *Simulink*.

Модель с сосредоточенными параметрами при управлении источником напряжения

Математическое моделирование проводилось на основе технических характеристик пьезоактюатора типа АПМ (Таблица) [4]. На рис. 1 представлена базовая структурная схема пьезоэлектрических исполнительных устройств.

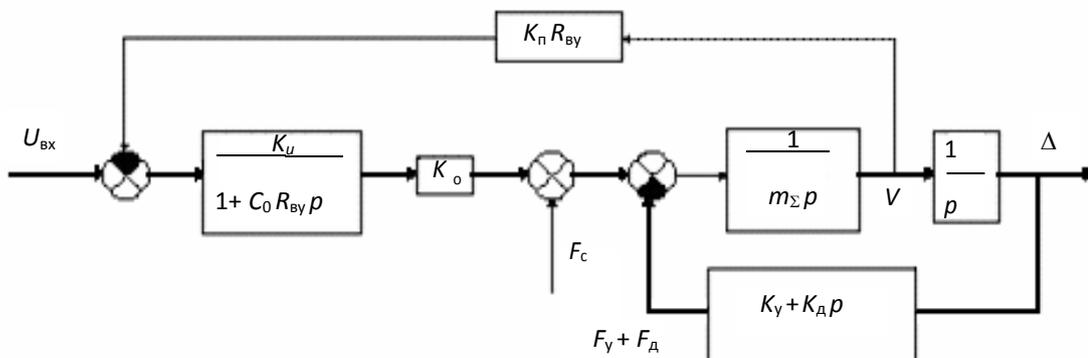


Рис. 1. Структурная схема пьезоэлектрического двигателя при управлении от источника ЭДС

Здесь $U_{вх}$ – входное напряжение, $K_{п}$ – коэффициент прямого пьезоэффекта, $R_{вх}$ – выходное сопротивление усилителя, K_u – коэффициент усиления, p – оператор Лапласа, K_o – коэффициент обратного пьезоэффекта, F_c – статическое усилие, действующее на пьезоактюатор, F_y – сила упругости, F_d – динамическая сила, K_d – коэффициент внутреннего демпфирования, m – эффективная масса, V – линейная скорость перемещения, C_o – емкость пьезоэлемента, K_y – коэффициент упругости [1]. Данная схема (рис. 1) с высокой степенью достоверности отражает процессы, происходящие в пьезоэлектрическом устройстве. Многослойный актюатор отличается от однослойного лишь большим количеством очень тонких слоев, что, безусловно, нужно учесть при моделировании:

– жесткость, собственная частота и сила, развиваемая многослойным актюатором могут быть рассчитаны, как для сплошного пьезоэлемента с теми же геометрическими параметрами;

– резонансная частота самого актюатора находится в диапазоне частот выше 10 кГц, что при полосе пропускания пьезопроводов в 100–200 Гц позволяет ее не учитывать при моделировании.

Таблица

Параметры пьезоактюатора

Параметр	Обозначение	Числовое значение	Единицы измерения
Максимальное управляющее напряжение	U_{\max}	125	В
Внутреннее сопротивление усилителя	R_o	2617,2	Ом
Емкость пьезоэлемента	C_o	3,1000e-007	Ф
Масса нагрузки	m_o	0,015	кг
Масса актюатора	m_a	0,045	кг
Суммарная масса	$m = 0.382 \cdot m_a + m_o$	0,0322	кг
Коэффициент прямого и обратного пьезоэффекта	K_p, K_o	1,7609	-
Коэффициент упругости	K_y	1,4823e8	Н/м
Коэффициент демпфирования	K_d	27,3045	кг/с

Численные значения параметров модели привода определены с учетом характеристик актюатора (Таблица) и следующих выражений [4]:

– для коэффициента упругости: $K_y = \frac{S_0 Y_{33}}{L}$;

– для коэффициента обратного пьезоэффекта: $K_d = \frac{S_0 Y_{33}}{L}$;

– для электростатической постоянной времени: $T_s = C_o R = 0.0012 \text{ с}$.

Величину постоянной времени пьезопровода можно оценить по формуле:

$$T_M = \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{c_0}} = 0.00003 \text{ с},$$

где c_0 – жесткость пьезоактюатора, определяемая из выражения: $c_0 = \frac{S_0 c_{33}^D}{L} = 9,2 \text{ Н/м}$.

Используя параметры пьезоактюатора, можно получить модель пьезопривода (рис. 2) Моделирование спроектированной системы проводилось в оболочке *MatLab* и *Simulink*.

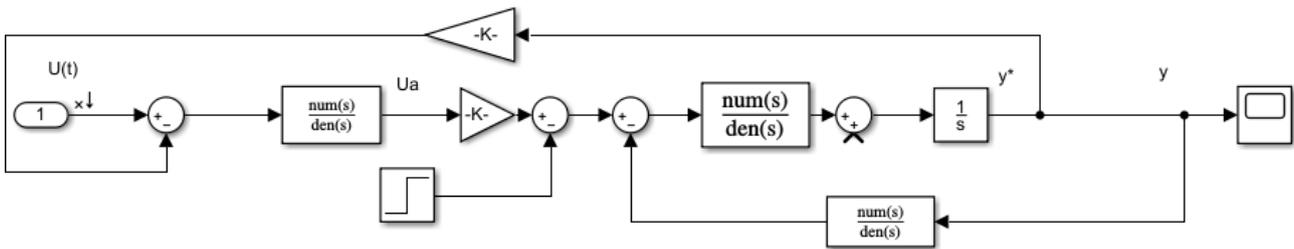


Рис. 2. Модель пьезоэлектрического двигателя при управлении от источника ЭДС одномассовой модели пьезоактюатора спроектированного в комплексе *MatLab*

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) модели представлена на рис. 3.

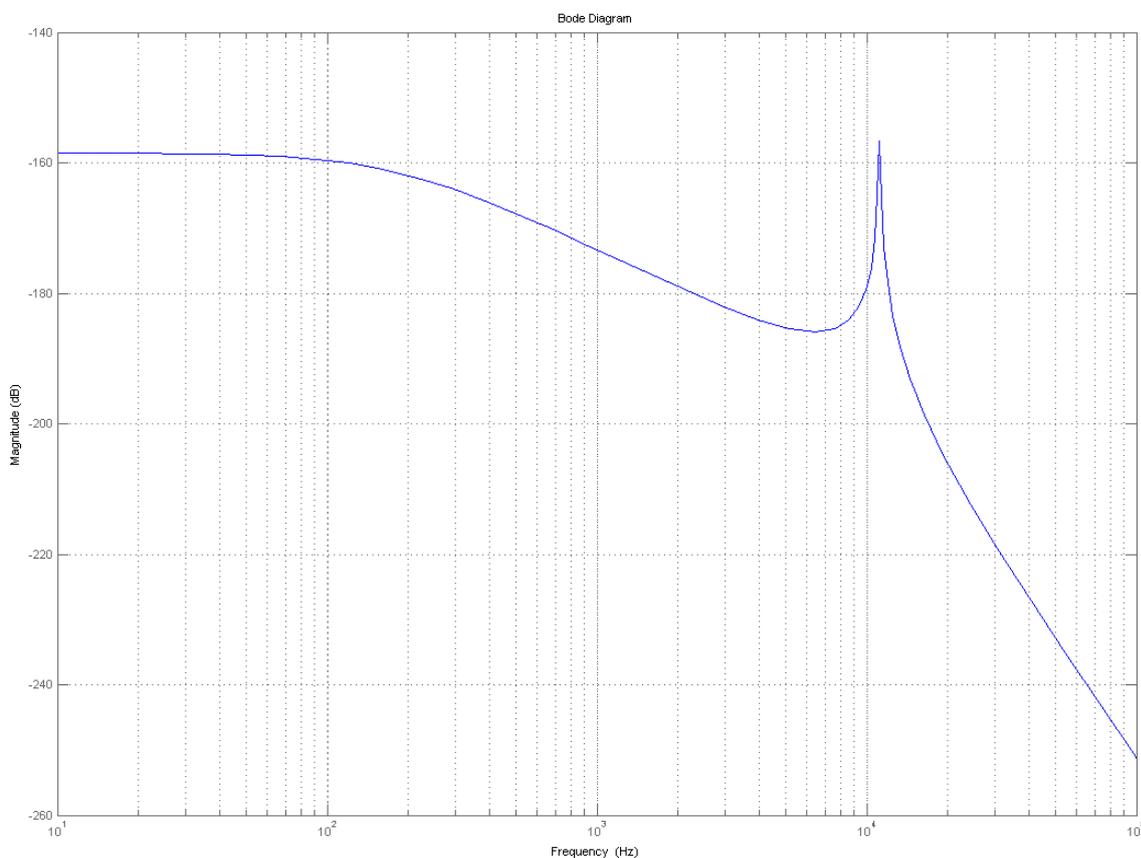


Рис. 3. ЛАЧХ одномассовой модели пьезоактюатора

Минимального влияния прямого пьезоэффекта и инерционности преобразователя можно добиться различными аппаратными средствами. Так, снизить выходное сопротивление усилителя легко с помощью мощных выходных транзисторов, а для минимизации влияния прямого пьезоэффекта применяются специальные быстродействующие контуры регулирования управляющего поля с включением в схему усилителя дополнительных диодов, образующих цепи замыкания наведенных токов. Кроме того, влияние внутреннего демпфирования обычно очень мало, и им можно пренебречь.

Переходные процессы пьезоактюатора

Рассматривалась конструкция пьезоактюатора, в качестве материалов для элементов которой использовались: сталь, пьезокерамика, органическое стекло и резина. Анализ

проведен при штатной работе устройства, то есть при подключении его к источнику питания с синусоидальным сигналом амплитудой 125 В.

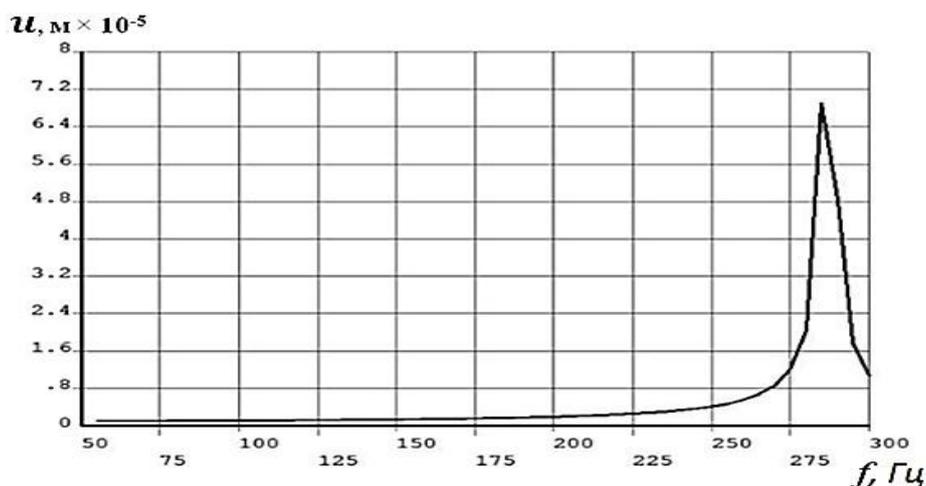
Сначала был осуществлен модальный анализ для определения резонансных частот, при которых конструкция пьезоактюатора совершает максимальные перемещения по оси Z. Были получены следующие моды: 1–150 Гц и 6–13520 Гц [5].

В результате гармонического анализа была определена частота, при которой перемещения толкателя максимальны: $f_0 = 140$ Гц, $X = 28,1 \cdot 10^{-6}$ м, а также резонансная частота пьезоактюатора без инерционной нагрузки при работе в штатном режиме ($U_{\text{вх}} = 125$ В), которая составила 140 Гц.

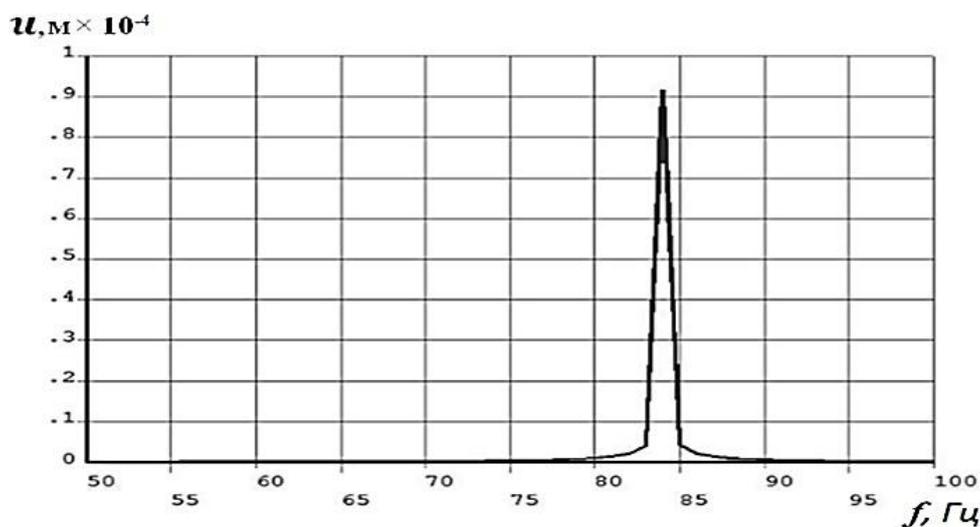
Следующим этапом был выполнен нестационарный анализ переходных процессов пьезоактюатора, рассчитаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) его режимов работы.

Графики амплитудно-частотных характеристик пьезоактюатора

Целью компьютерного моделирования является построение АЧХ и, как следствие, определение первой собственной частоты динамической системы. Исходные параметры для построения графиков: $I = 0,5$ А, предварительное поджатие $F_0 = 250$ Н, вес нагрузки 10 и 30 кг соответственно. При этом резонансная частота оказалась равной $f_0 = 283$ Гц (рис. 4а) и $f_0 = 84$ Гц (рис. 4б).



а



б

Рис. 4. Частотные характеристики на нагрузке пьезоактюатора

Следует отметить, что вид частотных характеристик существенно зависит от силы предварительного поджатия. Чем она выше, тем больше резонансов формируется на частотной характеристике. Рабочая частота находится в области $f \leq 1$ кГц и при увеличении предварительного поджатия величина силы на нагрузке растет. Данный подход позволяет определить параметры пьезоактюатора на стадии проектирования с учетом условий его эксплуатации.

Заключение

Основными преимуществами предложенного метода является, во-первых, единая технология синтеза структуры базовых алгоритмов управления; во-вторых, возможность модификации и расширения набора базовых алгоритмов с помощью типовых процедур синтеза; в-третьих, достижение высокого качества управления при ограниченных по амплитуде управляющих воздействиях. Были рассчитаны статические и динамические характеристики пьезоактюатора нано- и микроперемещений для оборудования нанотехнологии и микроэлектроники, построена параметрическая структурная схема пьезоактюатора и определено влияние физических и геометрических параметров пьезоактюатора на его статические и динамические характеристики. Разработана модель системы пьезоактюатора, позволяющая рассчитать его АЧХ при подаче на контактные электроды синусоидального сигнала с заданной частотой и амплитудой. По АЧХ видно, что количество пиков характеристики динамических усилий соответствует числу контуров электрической схемы замещения. С увеличением предварительного поджатия частотные характеристики динамических усилий изменяются, значения промежуточных резонансов уменьшаются.

Литература

1. Никифоров В.Г. Многослойные пьезоэлектрические актюаторы: теория и практика. Зеленоград, 2005. – 68 с.
2. Земляков В.Л. Развитие пьезоэлектрического приборостроения на основе новых информационно-измерительных и технологических методов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. – 112 с.
3. Шаранов В.М. и др. Пьезоэлектрические датчики. М., 2006. – 632 с.
4. Gilder N. et al. Effective damping value of piezoelectric transducer determined by experimental techniques and numerical analysis // ABCM Symposium Series in Mechatronics. Vol. 1. Sao Paulo, 2004. P. 5–7.
5. Вишенков А.В. Разработка автоматизированных пьезоприводных средств определения метрологических характеристик приборов размерного контроля деталей в микрометрическом диапазоне: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. – 17 с.
6. Кузенко Д.В. и др. Релаксация свойств и структурные изменения в пьезокерамике $Pb(Zr,Ti)O_3$ после электрической переполяризации // Вестник Донецкого национального университета. 2011. № 2. С. 2-3.



Смирнов Сергей Николаевич
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: s.n.smirnov@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АБЛЯЦИИ КАТАРАКТАЛЬНОГО ХРУСТАЛИКА ИЗЛУЧЕНИЕМ Yb, Er: GLASS-ЛАЗЕРА

С.Н. Смирнов

Научный руководитель – профессор А.В. Беликов

Введение

Одним из современных малоинвазивных методов хирургии катаракты является лазерная экстракция катаракты (ЛЭК). Метод ЛЭК состоит в фрагментации хрусталика при помощи излучения *Nd: YAG*-лазера с длиной волны $\lambda = 1,44$ мкм [1–3]. Разрушение катарактальных хрусталиков с использованием такого излучения отличается малой инвазивностью благодаря высокой селективности воздействия излучения безопасного для глаз диапазона длин волн.

Применяемый в аппарате для ЛЭК «РАКОТ» *Nd: YAG*-лазер с ламповой накачкой генерирует импульсы в режиме свободной генерации с энергией до 400 мДж, длительностью до 200 мкс и частотой повторения до 30 Гц. Низкое значение сечения усиления на штарковских подуровнях неосновного лазерного перехода ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ ионов неодима [4] приводит к необходимости применения для достижения требуемых для эффективной работы аппарата выходных параметров киловаттного уровня мощности источника питания ламповой накачки. Высокое энергопотребление и необходимость мощной системы охлаждения приводят к тому, что аппарат «РАКОТ» имеет большие габариты и вес.

Одним из направлений дальнейшего развития аппаратуры этого класса является проектирование малогабаритных мобильных устройств на базе твердотельных лазеров с диодной накачкой. В качестве альтернативы *Nd: YAG*-лазера для экстракции катарактальных хрусталиков можно использовать излучение малогабаритного лазера на иттербий-эрбиевом стекле (*Yb, Er: Glass*, длина волны $\lambda = 1,54$ мкм) с диодной накачкой [5]. Такое стекло позволяет получить прямую генерацию на длине волны 1,54 мкм, которая находится в пределах линии резонансного поглощения воды (основной компонент мягких биотканей) с максимумом в области 1450 нм [6].

Проведенные ранее исследования взаимодействия импульсов излучения *Yb, Er: Glass*-лазера с жидкостью [7] показали, что воздействие микросекундных импульсов с энергией 100 ± 5 мДж вызывает образование в ней парогазовых полостей. При этом лазерное воздействие сопровождается генерацией акустических волн как в момент действия импульса, так и при схлопывании парогазовой полости (через 300 ± 20 мкс после действия лазерного импульса). Интенсивные акустические волны могут оказывать влияние на эффективность разрушения хрусталика.

Цель данного проекта – определение плотности энергии излучения *Yb, Er: Glass*-лазера, необходимой для абляции катарактального хрусталика (определение порога абляции), а также определение эффективности и скорости лазерной абляции биоткани. Для достижения указанной цели необходимо:

- разработать и собрать экспериментальный стенд;

- отобрать образцы (катарактальных хрусталиков глаза человека) для *in vitro* эксперимента;
- провести эксперимент: воздействовать на образцы хрусталика глаза человека в жидкости и на воздухе микросекундными импульсами *Yb, Er: Glass*-лазера и оценить последствия этого воздействия.

Материалы и методы исследования

В исследовании использовались три хрусталика глаза человека с плотной бурой катарактой. Образцы, полученные в ходе операции по хирургии катаракты методом экстракапсулярного изъятия, были предоставлены Санкт-Петербургским филиалом МНТК «Микрохирургия глаза». После экстракции образцы помещались в вискоэластик и хранились не более одной недели при температуре 4–6 °С. Перед лазерным воздействием они промывались в физрастворе комнатной температуры и хранились в нем в течение 30 минут.

В качестве источника лазерного излучения использовался *Yb, Er: Glass*-лазер с ламповой накачкой, работающий в режиме модуляции полезных потерь резонатора (рис. 1).

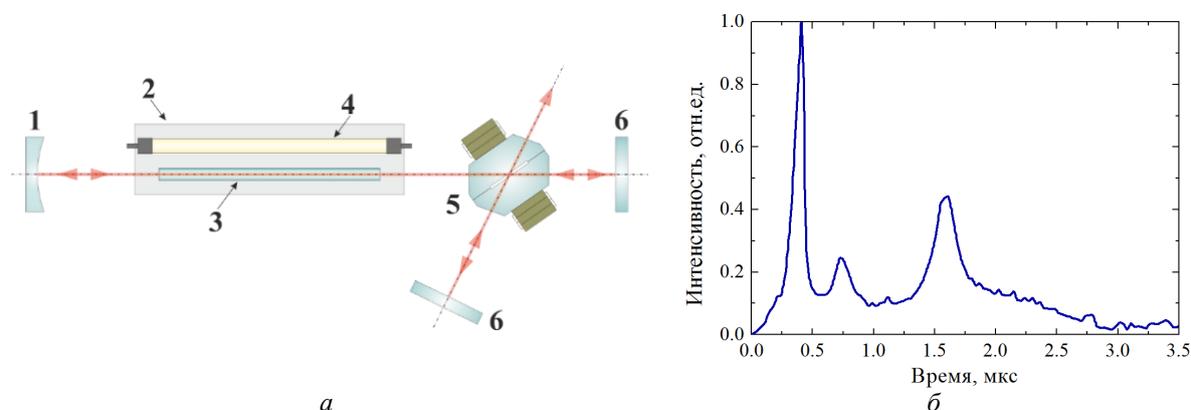


Рис. 1. а – схема *Yb, Er: Glass*-лазера; б – типичный временной профиль импульса генерации *Yb, Er: Glass* лазера, работающего в режиме модуляции полезных потерь резонатора

Схема экспериментального стенда для исследования лазерной абляции хрусталика представлена на рис. 2а, где: 1 – *Yb, Er: Glass*-лазер, 2 – френелевский ослабитель, 3 – светоделитель (стеклянная пластина), 4 – измерительная головка «PE10-V2» (*Ophir Optronics*, Израиль), 5 – узел ввода излучения в оптическое волокно, 6 – измеритель энергии/мощности «Nova II» (*Ophir Optronics*, Израиль), 7 – оптическое волокно в держателе, 8 – хрусталик в держателе, 9 – осциллограф «TDS 2012 В» (*Tektronix, Inc.*, США), 10 – германиевый фотодиод, 11 – компьютер.

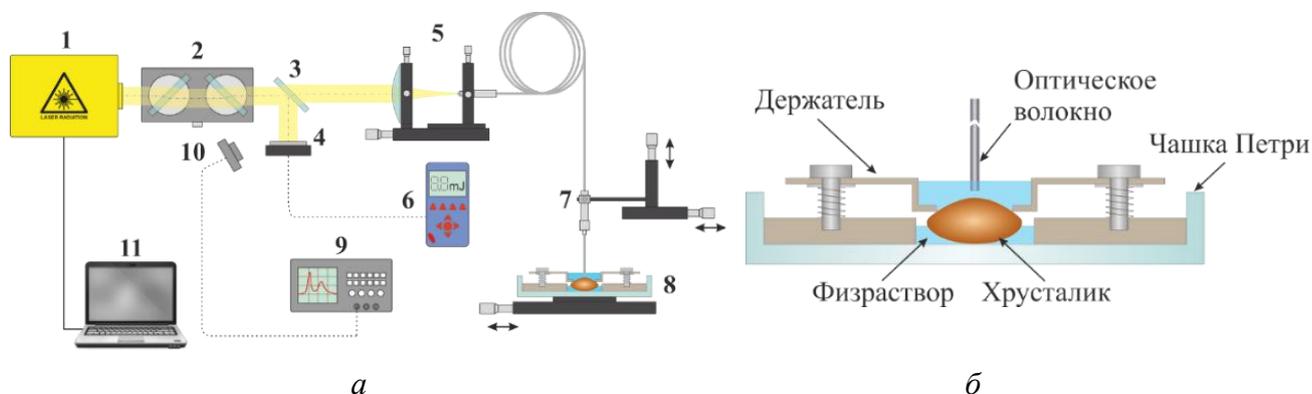


Рис. 2. а – схема экспериментального стенда для исследования лазерной абляции хрусталика; б – увеличенное изображение схемы крепления образца (хрусталика)

В эксперименте лазерное воздействие на биоткань производилось через кварц-кварцевое оптическое волокно с диаметром сердцевины 470 ± 10 мкм. Хрусталики закреплялись в специально изготовленном держателе и находились под слоем физраствора, что, с одной стороны, препятствовало высыханию образца, а с другой – позволяло учесть влияние на процесс абляции возникающей в жидкости лазерно-индуцированной гидродинамики.

Образцы подвергались воздействию $N = 600$ лазерных импульсов с энергией $E_p = 100 \pm 2$ мДж при частоте повторения $f = 1$ Гц. При меньшем числе импульсов повреждения были менее заметны. Лазерное воздействие проводилось как на воздухе, так и в жидкости (физраствор) при различных расстояниях h между дистальным торцом оптического волокна и поверхностью образца хрусталика. В эксперименте величина h принимала значения 0 и 0,3 мм при воздействии на воздухе и 0, 0,3, 0,5 и 1 мм при воздействии в жидкой среде.

Оценка последствий воздействия лазерными импульсами была проведена при помощи оптической микроскопии с использованием микроскопа «МСП-1» (АО «ЛОМО», Россия). Регистрировались вид сверху и продольные срезы сформированных лазерным излучением кратеров в хрусталике. Для одного образца было проведено сравнение микроскопической фотографии лазерного кратера с изображением, полученным при помощи оптической когерентной томографии (использовался аппарат «Visante» («Carl Zeiss», Германия)).

Объемы лазерных кратеров в биоткани определялись по полученным изображениям методом разбиения кратера на простые объемные геометрические фигуры (цилиндр, усеченный конус, шаровой сегмент). Значения эффективности (AE) и скорости (AR) абляции оценивались по следующим выражениям:

$$AR = \frac{V_c}{N}, \quad AE = \frac{V_c}{N \cdot E_p},$$

где V_c – объем сформированного лазерным излучением кратера в биоткани, N – количество лазерных импульсов, воздействующих на одну точку, E_p – энергия одиночного лазерного импульса.

Результаты исследования и обсуждение

Фотографии бурых катарактальных хрусталиков глаза человека после воздействия 600 импульсов излучения $Yb, Er: Glass$ -лазера с энергией $E_p = 100 \pm 2$ мДж на воздухе и в жидкости при различных значениях расстояния h от дистального торца оптического волокна до поверхности образца представлены на рис. 3.

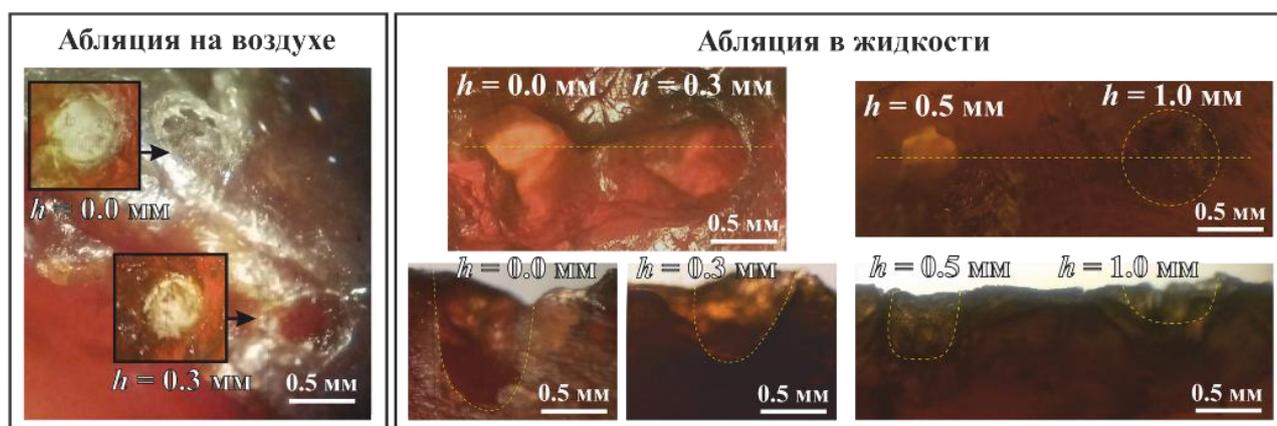


Рис. 3. Фотографии вида сверху и продольных срезов кратеров, сформированных лазерным излучением в катарактальных хрусталиках глаза человека

Видно, что в случае абляции на воздухе сформированные лазерным излучением повреждения представляют собой поверхностные дефекты (при $h = 0$ мм), либо микрократеры (при $h = 0,3$ мм). Можно отметить побеление биоткани в месте воздействия лазерных импульсов: лазерная рана содержит коагулированные продукты разрушения.

При абляции в жидкости ситуация резко изменяется. Сформированные лазерным излучением кратеры в биоткани достигают 0,9 мм в глубину при $h = 0$ мм. С увеличением h глубина формируемых кратеров уменьшается. На фотографиях вида сверху, соответствующих значениям $h = 0$ мм и $h = 0,3$ мм можно заметить, что пространство между кратерами также повреждено. Причиной этому может стать особенность строения биоткани хрусталика, которая состоит из волокон и имеет слоистую структуру. Отдельные «пластины» волокон могут быть удалены благодаря воздействию лазерно-индуцируемых акустических волн.

При $h = 1$ мм лазерное повреждение мало и слабо идентифицируется при помощи оптической микроскопии. Оно может быть принято за порог абляции биоткани. При пересчете плотности энергии на поверхности биоткани (W_E) с учетом расходимости излучения и поглощения в жидкости можно установить, что абляция биоткани при $N = 600$ происходит при $W_E \geq 6,9$ Дж/см².

Разрушение хрусталика при условии лазерного воздействия в жидкости определяется не только прямым воздействием излучения, но и влиянием лазерно-индуцированных акустических волн. Оценка их вклада в разрушение биоткани хрусталика является предметом дальнейших исследований.

Можно предположить, что поскольку хрусталик представляет собой неоднородный слоистый материал, состоящий из волокон, прямое воздействие лазерного излучения может приводить к их разрушению, а комплексное воздействие волн отрицательного давления при схлопывании лазерно-индуцированной парогазовой полости и давления сжатия во время воздействия кумулятивной струи жидкости – способствовать увеличению эффективности разрушения биоткани. Кроме того, лазерно-индуцированная гидродинамика может содействовать очищению лазерного кратера от продуктов абляции, которые могут поглощать и рассеивать лазерное излучение, уменьшая при этом эффективность разрушения.

По данным с фотографий, представленных на рис. 3, были определены объемы лазерных кратеров, а также значения скорости и эффективности лазерной абляции биоткани (рис. 4).

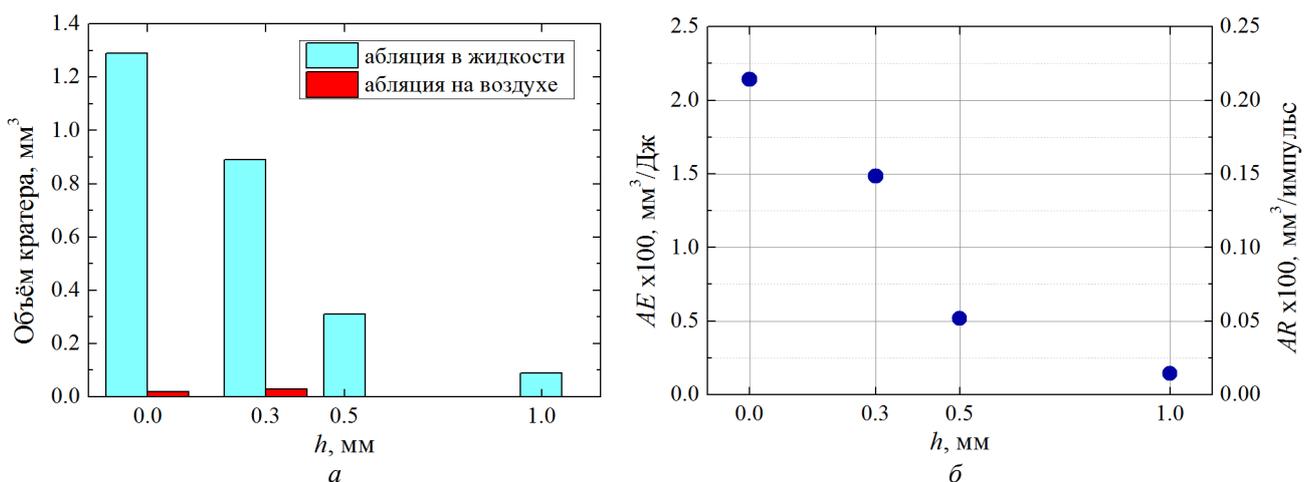


Рис. 4. а – зависимость объема лазерных кратеров от h ; б – зависимость значений скорости и эффективности лазерной абляции катарактального хрусталика от h

Из-за малой величины повреждений объем кратеров для случая абляции на воздухе не измерялся, и на рис. 4а данные представлены только для качественного сравнения. Видно,

что эффективность абляции биоткани катарактального хрусталика в жидкости значительно выше, чем при воздействии на воздухе.

На рис. 4б можно видеть, что эффективность и скорость абляции уменьшаются с увеличением h . Логично предположить, что это вызвано поглощением части энергии лазерного излучения окружающей жидкостью.

Во время исследования лазерных кратеров при помощи оптической микроскопии было отмечено, что метод разрезания образца (для получения продольных срезов кратеров) позволяет получить относительно грубые значения их размеров. Это связано с тем, что плоскость сечения может быть смещена от центра кратера, а его оригинальная форма изменена механическим воздействием лезвия бритвы. Объем кратера можно оценить более точно, используя ОКТ-визуализацию. На рис. 5 представлено сравнение изображений продольных срезов кратеров, полученных при помощи оптической микроскопии и ОКТ-визуализации.

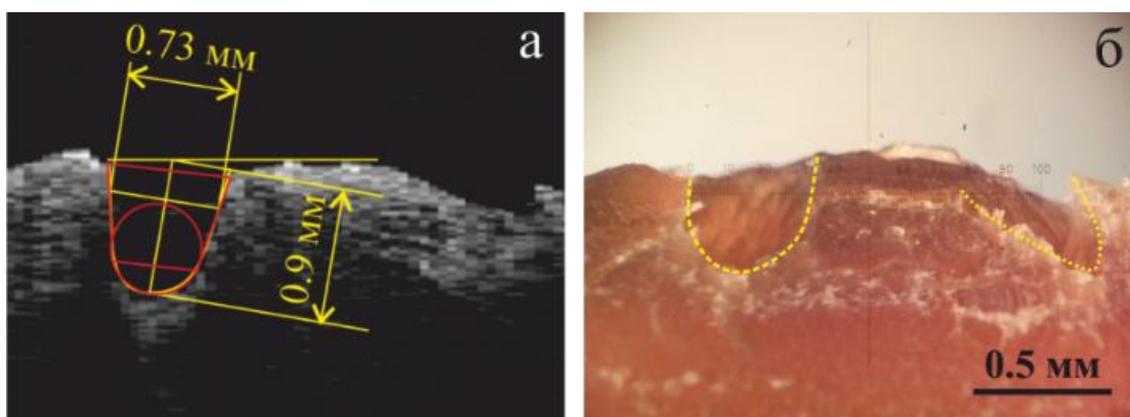


Рис. 5. Изображения продольных срезов лазерных кратеров, полученные при помощи: а – ОКТ-визуализации; б – оптической микроскопии

Выделенный на рис. 5а кратер был получен при воздействии 600 лазерных импульсов с энергией $E_p = 100 \pm 2$ мДж в жидкости при $h = 0,25$ мм. Используя данные с этого изображения, можно оценить его объем – $V_c \approx 1$ мм³. Видно, что методы регистрации формы кратера с использованием ОКТ и оптической микроскопии дают схожие результаты, однако для более точной оценки объема предпочтительно использование ОКТ-визуализации.

Заключение

В результате работ, проведенных при выполнении проекта, исследованы особенности взаимодействия мощных микросекундных импульсов $Yb, Er: Glass$ -лазера с биотканью катарактального хрусталика глаза человека на воздухе и в жидкости при волоконной доставке излучения.

Показано, что процесс разрушения катарактального хрусталика в жидкости отличается значительно большей эффективностью, чем в случае воздействия на воздухе.

Впервые были получены значения скорости и эффективности абляции хрусталика в условиях лазерного воздействия (600 импульсов с энергией 100 ± 2 мДж) в жидкой среде. Максимальное значение скорости абляции составило $AR = 2,14 \cdot 10^{-3}$ мм³/импульс, а максимальное значение эффективности – $AE = 2,14 \cdot 10^{-2}$ мм³/Дж.

При воздействии на биоткань бурого катарактального хрусталика глаза человека в жидкости 600 микросекундных импульсов излучения $Yb, Er: Glass$ -лазера значение пороговой плотности энергии излучения, необходимой для начала абляции биоткани, составляет $W_E \approx 6,9$ Дж/см². Разрушение в условиях лазерного воздействия в жидкости определяется не только прямым воздействием лазерного излучения, но и влиянием лазерно-индуцированных акустических волн.

Публикации

1. *Belikov A.V., Gagarsky S.V., Sergeev A.N., Smirnov S.N.* In vitro destruction of anterior human lens capsule by submicrosecond pulses of Yb,Er:Glass laser // *Proceedings of SPIE*. 2017. Vol. 10336. P. 103360B.
2. *Беликов А.В., Гагарский С.В., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н.* Исследование гидродинамических процессов в жидкости при воздействии мощных микросекундных импульсов Yb,Er:Glass-лазера // *Известия вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 4. С. 367–374.
3. *Беликов А.В., Гагарский С.В., Губин А.Б., Вайнер С.Я., Сергеев А.Н., Смирнов С.Н.* Субджоульный лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и модуляцией полезных потерь резонатора для экстракции катаракты // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 6 (100). С. 1021–1029.

Литература

1. *Федоров С.Н. и др.* Лазерная экстракция катаракты (экспериментальные исследования) // *Офтальмохирургия*. 1998. № 3. С. 3–10.
2. *Копеева В.Г., Андреев Ю.В.* Лазерная экстракция катаракты. М., 2011. – 262 с.
3. *Копеева В.Г. и др.* Использование лазерной энергии в хирургии катаракты // *Вестник Российской Академии Естественных Наук*. 2012. № 1. С. 77–80.
4. *Hodgson N. et al.* Efficient 100-W Nd:YAG laser operating at a wavelength of 1.444 μm // *Optics Letters*. 1994. Vol. 19. No 17. P. 1328–1330.
5. *Беликов А.В. и др.* Субджоульный лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой и модуляцией полезных потерь резонатора для экстракции катаракты // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 6 (100). С. 1021–1029.
6. *Palmer K.F., Williams D.* Optical properties of water in the near infrared // *Journal of the Optical Society of America*. 1974. Vol. 64. No 8. P. 1107–1110.
7. *Беликов А.В. и др.* Исследование гидродинамических процессов в жидкости при воздействии мощных микросекундных импульсов Yb,Er:Glass-лазера // *Известия вузов. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 4. С. 367–374.



Смолкина Мария Олеговна
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра высшей математики
E-mail: vega14@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ СВОЙСТВ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНОГО ГРАФА С ЦЕПОЧКОЙ ИЗ КОЛЕЦ ХОЛШТЕЙНА – ХАББАРДА СО СПИН- ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ТИПА РАШБЫ

М.О. Смолкина

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

Когда заряженная частица движется вдоль замкнутого пути вокруг трубки потока, ее волновая функция получает фазу, даже если магнитное поле нулевое. Это называется эффектом Ааронова – Бома. В данной работе предполагается, что магнитный поток пронизывает кольцо таким образом, что магнитное поле на радиусе кольца нулевое. В этом случае возникает такое явление, как незатухающий ток. Бюттикер, Имри и Ландауэр [1] первыми предположили существование незатухающего тока в нормальных металлических кольцах. Однако влияние температуры, случайности и химического потенциала на незатухающий ток одномерной модели нормальных колец отражают работы Шеюнга [2]. Существование незатухающего тока, а также его периодичность в квантовых кольцах позднее с появлением нанотехнологий были подтверждены экспериментальными достижениями [3]. В качестве наиболее используемой модели для изучения незатухающего тока выступает модель Хаббарда, в которой кольцо состоит из вершин дискретной решетки и электроны могут перескакивать с одного места на другое. Однако существует некоторый недостаток этой модели – она не учитывает электрон-фононное взаимодействие, которое играет очень важную роль в низкоразмерных системах. Для изучения влияния электрон-фононного взаимодействия на незатухающий ток используется модель Холштейна – Хаббарда [4].

Другое немаловажное взаимодействие, которое также изучается в наносистемах, в том числе и в квантовых кольцах, – это спин-орбитальное взаимодействие [5]. Существуют два вида спин-орбитального взаимодействия: асимметрия инверсии структуры (взаимодействие типа Рашбы) и асимметрия инверсии массы (спин-орбитальное взаимодействие типа Дрессельхауза). Эффект Рашбы позволяет контролировать спин электрона благодаря внешнему электрическому полю. Это позволит нам в ходе работы изучить влияние спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы на незатухающий ток.

Существуют работы, в которых широко изучено влияние различных параметров системы на незатухающий ток в кольце [6], а также в цепочке из двух колец [7–9] Холштейна – Хаббарда со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы. Однако до настоящего времени моделей, позволяющих изучить влияние спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы на незатухающий ток в графе с цепочкой из колец Холштейна – Хаббарда, пронизываемых потоком Ааронова – Бома, не существует.

Построение модели

В ходе работы рассматривается граф, который состоит из конечного множества вершин и множества ребер, соединяющих вершины (граф типа «дерево»), а также конечного числа конечных симметричных цепочек вершин с ребрами, соединяющими

соседние вершины цепочки и имеющими одинаковую длину и одинаковые потенциалы на этих ребрах (рис. 1) [11–13].

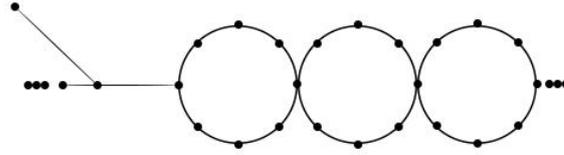


Рис. 1. Геометрия системы

Поместим описанный выше граф в магнитное поле таким образом, чтобы оно проходило сквозь кольца, но чтобы в самом металле, где могут двигаться электроны, магнитного поля не было. Это квантово-механический эффект, который может наблюдаться в малых металлических кольцах, чей размер сравним с длиной когерентности электрона. В этом случае при низкой температуре в кольце самопроизвольно возникает незатухающий ток. Он зависит от пронизывающего кольцо магнитного потока и является его периодической функцией. Незатухающий ток в кольце Холштейна – Хаббарда со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы исследован в [5]. Для построения модели в данной работе будет использован метод, описанный в [7]. Далее будем рассматривать две части графа в отдельности.

1. Граф типа «дерево». В этом случае существует множество работ, изучающих свойства спектра Гамильтониана в магнитном поле [11,12]. Нами также ранее была построена и проанализирована модель для данной части графа [13–15].

2. Конечное число конечных симметричных цепочек вершин и ребра, соединяющие соседние вершины цепочки.

Соответствующие Гамильтонианы системы описываются следующими выражениями:

$$H_{el} = \varepsilon_0 \sum_i c_i^\dagger c_i + \varepsilon_0 \sum_m \sum_k c_k^\dagger c_k - te^{\gamma\theta} \sum_{\langle i,j \rangle} (c_i^\dagger c_j + h.c) - \frac{t}{2} e^{\gamma\theta} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle} (c_k^\dagger c_l + h.c) + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + U \sum_m \sum_k n_{k\uparrow} n_{k\downarrow}, \quad (1)$$

$$H_p = \hbar\omega_0 \sum_i \left(b_i^\dagger b_i + \frac{1}{2} \right) + \hbar\omega_0 \sum_m \sum_k \left(b_k^\dagger b_k + \frac{1}{2} \right), \quad (2)$$

$$H_{ep} = g_1 \sum_i n_i (b_i + b_i^\dagger) + g_1 \sum_m \sum_k n_k (b_k + b_k^\dagger) + g_2 \sum_{\langle i,j \rangle} n_i (b_j + b_j^\dagger) + \frac{g_2}{2} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle} n_k (b_l + b_l^\dagger), \quad (3)$$

$$H_{so} = -t \sum_{\langle i,j \rangle} (c_i^\dagger t_{so} e^{\gamma\theta} c_j + h.c) - \frac{t}{2} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle} (c_k^\dagger t_{so} e^{\gamma\theta} c_l + h.c), \quad (4)$$

где m – число конечных симметричных цепочек вершин.

Стоит также отметить, что (i, j) – это любые пары на окружности, кроме точки пересечения и ее соседей, а (k, l) – это пары, включающие точку пересечения и ее ближайших соседей.

Выражение для H_{el} представляет собой Гамильтониан электрона и состоит из четырех слагаемых. Первые два слагаемых представляют собой энергию позиции, ε_0 –

локальная энергия, $c_i = \begin{pmatrix} c_{i\uparrow} \\ c_{i\downarrow} \end{pmatrix}$, $c_{i\sigma}^\dagger (c_{i\sigma})$ – операторы рождения (уничтожения) для электрона

в i -м месте со спином σ , i – общее число мест в системе, кроме точки пересечения окружности и ее ближайших соседей, k – точка пересечения окружностей и ее

ближайшие соседи. Третье и четвертое слагаемые описывают переход с одного места на соседнее, где t – интеграл перехода между ближайшими соседями, $\theta = (2\pi\varphi/n)$ – фаза магнитного потока Ааронова – Бома, которая представляет собой кратное целое элементарной величины потока $\Phi_0 = hc/e$. Пятое и шестое слагаемые описывают локальное отталкивающее взаимодействие типа Колумба, где U измеряет силу отталкивания и $n_{i\sigma} = c_{i\sigma}^\dagger c_{i\sigma}$ – оператор числа электронов в положении i со спином σ . Уравнение H_p представляет собой Гамильтониан для невозмущенного фонона, где $b_{i\sigma}^\dagger (b_{i\sigma})$ – оператор рождения (уничтожения) для фонона с частотой рассеяния ω_0 в положении i . Выражение для H_{ep} описывает локальное электрон-фононное и электрон-фононное взаимодействие ближайших соседей с g_1, g_2 – соответствующими константами взаимодействия. Таким образом, g_1 измеряет силу электрона с фононом на i -м месте, тогда как g_2 измеряет силу взаимодействия электрона на i -м месте с фононом на $(i+1)$ -м месте. Значение g_2 в общем случае меньше, чем g_1 и для реального материала можно брать значение g_2 на порядок меньше, чем g_1 .

Анализ модели

В данной части работы будет проведен математический анализ модели описанного графа с использованием таких методов, как преобразование Ланг – Фирсова, унитарное преобразование, диагонализация эффективного Гамильтониана с помощью метода Хартри – Фока.

Как уже было отмечено ранее, часть графа, представляющая собой «дерево» была достаточно хорошо рассмотрена в более ранних работах, поэтому остановимся подробнее на второй части графа.

Проведем преобразование Ланг – Фирсова [10] с ядром следующего вида:

$$R = \frac{1}{\hbar\omega_0} (g_1 \sum_{i\sigma} n_{i\sigma} (b_i^+ - b_i) + g_1 \sum_m \sum_{k\sigma} n_{k\sigma} (b_k^+ - b_k) + g_2 \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} n_{i\sigma} (b_j^+ - b_j) + \frac{g_2}{2} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma} n_{k\sigma} (b_l^+ - b_l)) \quad (5)$$

Учитывая, что $\hat{H} = e^R H e^{-R} = H + [R, H] + \frac{1}{2!} [R, [R, H]] + \dots$, преобразованный

Гамильтониан \bar{H} имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{H} = & -\frac{1}{\hbar\omega_0} (g_1^2 + z g_2^2) \sum_{i\sigma} n_{i\sigma} - t e^{i\theta} \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} e^{(Y_i - Y_j)} c_{i\sigma}^+ c_{j\sigma} - i e^{i\theta} \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} \begin{bmatrix} 0 & P \\ Q & 0 \end{bmatrix} e^{(Y_i - Y_j)} c_{i\sigma}^+ c_{j\sigma} + \\ & + (U - \frac{2}{\hbar\omega_0} (g_1^2 + z g_2^2)) \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} - \frac{g_2^2}{\hbar\omega_0} \sum_{i\Delta\sigma\sigma'} n_{i\sigma} n_{i+\Delta\sigma'} - \frac{2}{\hbar\omega_0} g_2 g_1 \sum_{\langle i,j \rangle \sigma\sigma'} n_{i\sigma} n_{j\sigma'} + \\ & + \hbar\omega_0 \sum_i \left(b_i^+ b_i + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{\hbar\omega_0} \sum_m \sum_{k\sigma} (g_1^2 + \frac{z_1}{4} g_2^2) n_{k\sigma} - \frac{t}{2} e^{i\theta} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma} e^{(Y_k - Y_l)} c_{k\sigma}^+ c_{l\sigma} - \\ & - \frac{t}{2} e^{i\theta} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle} \begin{bmatrix} 0 & P \\ Q & 0 \end{bmatrix} e^{(Y_k - Y_l)} c_k^+ c_l + \sum_m \sum_k (U - \frac{2}{\hbar\omega_0} (g_1^2 + \frac{z_1}{4} g_2^2)) n_{k\uparrow} n_{k\downarrow} - \\ & - \frac{g_2^2}{2\hbar\omega_0} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma\sigma', k,l \neq 0} n_{k\sigma} n_{l\sigma'} + \frac{1}{\hbar\omega_0} g_2 g_1 \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma\sigma'} n_{k\sigma} n_{l\sigma'} + \hbar\omega_0 \sum_m \sum_k \left(b_k^+ b_k + \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Далее, чтобы получить эффективный гамильтониан, проведем усреднение по фононному вакууму, то есть исключим степени свободы фонона:

$$H_{eff} = \langle 0 | e^R H e^{-R} | 0 \rangle = \langle 0 | H | 0 \rangle. \quad (7)$$

Получаем:

$$\langle 0 | e^{Y_i - Y_j} | 0 \rangle = e^{-\frac{1}{\hbar\omega_0} [(g_1 - g_2)^2 + (z-1)g_2^2]}, \quad \langle 0 | e^{Y_k - Y_l} | 0 \rangle = e^{-\frac{1}{\hbar\omega_0} [(g_1 - g_2)^2 + (z_1-1)g_2^2]}.$$

Таким образом, эффективный Гамильтониан электрона в упрощенном виде выглядит следующим образом:

$$H_{eff} = m_0^e \sum_{i\sigma} n_{i\sigma} - t_e e^{i\theta} \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} c_{i\sigma}^+ c_{j\sigma} - t_{SO-e}^{ij} e^{i\theta} \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} c_{i\sigma}^+ c_{j\sigma} + U_e \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + \sum_m \sum_{k\sigma} m_{0k}^e n_{k\sigma} - \frac{e^{i\theta}}{2} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma} t_{ek} c_{k\sigma}^+ c_{l\sigma} - \frac{e^{i\theta}}{2} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma} t_{SO-ek}^{kl} c_{k\sigma}^+ c_{l\sigma} + \sum_m \sum_k U_{e1} n_{k\uparrow} n_{k\downarrow}, \quad (8)$$

При этом, $m_0^e = -\frac{(g_1^2 + z g_2^2)}{\hbar\omega_0}$, где z – число ближайших соседей (для всех точек на

кольце, кроме точки пересечения и ее ближайших соседей), $m_{0k}^e = -\frac{(g_1^2 + \frac{z_k}{4} g_2^2)}{\hbar\omega_0}$, где z_k – число ближайших соседей (для точки пересечения и ее ближайших соседей),

Следующим шагом в работе будет унитарное преобразование H_{eff} матрицей:

$$U_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ e^{\frac{2\pi i}{N}(m-\frac{1}{2})} & e^{\frac{2\pi i}{N}(m-\frac{1}{2})} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

С помощью этого преобразования мы избавимся от индекса зависимости в коэффициентах, которые отвечают за спин-орбитальное взаимодействие t_{SO-e}^{ij} , t_{SO-ek}^{ij} .

Старые операторы c_i переводятся в новое множество операторов $\hat{c}_i = U_i^+ c_i$.

Тогда Гамильтониан принимает следующий вид:

$$H_e = m_0^e \sum_{i\sigma} \hat{n}_{i\sigma} - \frac{1}{2} e^{i\theta} \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} c_{i\sigma}^+ [t_e + i\alpha_e] \hat{V} c_{j\sigma} + U_e \sum_i \hat{n}_{i\uparrow} \hat{n}_{i\downarrow} + \sum_m \sum_{k\sigma} m_{0k}^e \hat{n}_{k\sigma} - \frac{1}{4} e^{i\theta} \sum_m \sum_{\langle k,l \rangle \sigma} c_{k\sigma}^+ [t_{ek} + i\alpha_{ek}] \hat{V} c_{l\sigma} + \sum_m \sum_k U_{ek} \hat{n}_{k\uparrow} \hat{n}_{k\downarrow} + \frac{\hat{n}_i [c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\downarrow} + c_{i\downarrow}^\dagger c_{i\uparrow}]}{4} - \frac{[c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\downarrow} + c_{i\downarrow}^\dagger c_{i\uparrow}] \hat{n}_i}{4} + \sum_m \left(\frac{\hat{n}_k [c_{k\uparrow}^\dagger c_{k\downarrow} + c_{k\downarrow}^\dagger c_{k\uparrow}]}{4} - \frac{[c_{k\uparrow}^\dagger c_{k\downarrow} + c_{k\downarrow}^\dagger c_{k\uparrow}] \hat{n}_k}{4} \right). \quad (10)$$

Далее, используя приближение среднего поля, линеаризуем квадратичные члены в H_e . В одномерных (1D) системах наполовину заполненная полоса электрон-фононного взаимодействия может вызвать искривление решетки. Это приводит к димеризации с удвоением ячейки решетки. Для дальнейших преобразований поделим решетку на две подрешетки: с четными местами – А и с нечетными местами – В. Используя алгебраические упрощения, предложенные Кабибом и Колленом [16], получаем:

$$H_e^m = \sum_{i=1}^N \tilde{c}_i^+ [C + (-1)^i D] \tilde{c}_i - e^{i(\theta + \frac{\pi}{N})} \sum_{\langle ij \rangle \sigma, i, j \neq 0} \tilde{c}_{i\sigma}^+ [t_e E + i\alpha_e F] \tilde{c}_{j\sigma} + K_1 + \sum_m \sum_{k=0}^N \tilde{c}_k^+ [C_k + (-1)^k D_k] \tilde{c}_k - e^{i(\theta + \frac{\pi}{N})} \sum_m \sum_{\langle kl \rangle \sigma} \tilde{c}_{k\sigma}^+ [t_{ek} E + i\alpha_{ek} F] \tilde{c}_{l\sigma} + \sum_m K_2, \quad (11)$$

$$DW = \frac{N}{4\pi^2} \frac{\partial^2 E_{GS}}{\partial \Phi^2}, \Phi = \Phi_m, \quad (16)$$

где Φ_m – локальный минимум E_{GS} и может принимать значения либо 0, либо $\frac{1}{2}$, в зависимости от четности числа электронов.

Заключение

В рамках данной работы построена модель дискретного графа, который состоит из конечного множества вершин и ребер, соединяющих вершины (граф типа «дерево»), а также конечного числа конечных симметричных цепочек вершин с ребрами, соединяющими соседние вершины цепочки, имеющими одинаковую длину и потенциалы.

Проведен анализ построенной модели, в результате которого получены выражения, позволяющие численно просчитать зависимость незатухающего тока от изменений энергии основного состояния и магнитного потока, а также отражающие его основные свойства.

Несмотря на теоретический характер, работа может быть использована для реальной физической системы с определенными свойствами, например, при решении задач, связанных с возникновением и поведением незатухающего тока в низкоразмерных системах, таких как нанотрубки, нанопроводы, квантовые кольца и квантовые точки. Особенностью таких систем является наноразмерное расширение, и, если сравнивать с их массивными аналогами, то они обладают многими новыми физическими аспектами и находят существенное различие при изучении квантованных энергетических спектров. Это вызывает чрезвычайный интерес с точки зрения фундаментальной физики и различных приложений в микроэлектронике.

Публикации

1. *Smolkina M.O., Popov I.Y.* Persistent current in a chain of two Holstein – Hubbard rings in the presence of Rashba spin-orbit interaction // Days on Diffraction 2017: Book of Abstracts. St. Petersburg, 2017. P. 133.
2. *Смолкина М.О., Попов И.Ю.* Незатухающий ток в цепочке из двух колец Холштейна – Хаббарда со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы // Труды студенческого центра прикладных математических исследований. СПб., 2017. С. 70–76.
3. *Smolkina M.O., Popov I.Y.* GS energy in a chain of two Holstein – Hubbard rings in the presence of Rashba spin-orbit interaction // Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems: Book of Abstracts. St. Petersburg, 2017. P. 19.
4. *Smolkina M.O., Popov I.Y.* On the spectrum discreteness of the quantum graph Hamiltonian with delta-coupling // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 643. P. 012099.
5. *Kovaleva M.O., Popov I.Y.* Harnack's inequality for stokes graph // Zeitschrift fur Analysis und ihre Anwendungen. 2016. Vol. 35. No 4. P. 383–396.
6. *Kovaleva M.O., Popov I.Y.* On the spectrum discreteness of the quantum graph Hamiltonian with δ -coupling // 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint Petersburg OPEN 2015". Book of abstracts. St. Petersburg, 2015. P. 279–280.
7. *Kovaleva M.O.* On the Molchanov's condition for the spectrum discreteness of the quantum graph Hamiltonian // Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems: Book of Abstracts. St. Petersburg, 2014. P. 11.

Литература

1. *Buttiker M. et al.* Josephson behavior in small normal one-dimensional rings // Physics Letters A. 1983. Vol. 96. No 7. P. 365–367.

2. *Cheung H.-F. et al.* Persistent currents in small one-dimensional metal rings // *Physical Review B*. 1988. Vol. 37. No 11. P. 6050–6062.
3. *Castelano L.K. et al.* Control of the persistent currents in two interacting quantum rings through the Coulomb interaction and interring tunneling // *Physical Review B*. 2008. Vol. 78. No 19. P. 195315.
4. *Takada Y., Chatterjee A.* Possibility of a metallic phase in the charge-density-wave–spin-density-wave crossover region in the one-dimensional Hubbard – Holstein model at half filling // *Physical Review B*. 2003. Vol. 67. No 8. P. 081102.
5. *Sil S. et al.* Interplay of magnetic field and geometry in magneto-transport of mesoscopic loops with Rashba and Dresselhaus spin-orbit interactions // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. No 2. P. 024321.
6. *Monisha P.J. et al.* Persistent current in a correlated quantum ring with electron-phonon interaction in the presence of Rashba interaction and Aharonov – Bohm flux // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 20056.
7. *Смолкина М.О., Попов И.Ю.* Незатухающий ток в цепочке из двух колец Холштейна – Хаббарда со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы // *Труды студенческого центра прикладных математических исследований*. СПб., 2017. С. 70–76.
8. *Smolkina M.O., Popov I.Y.* Persistent current in a chain of two Holstein – Hubbard rings in the presence of Rashba spin-orbit interaction // *Days on Diffraction 2017: Book of Abstracts*. St. Petersburg, 2017. P. 133
9. *Smolkina M.O., Popov I.Y.* GS energy in a chain of two Holstein – Hubbard rings in the presence of Rashba spin-orbit interaction // *Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems: Book of Abstracts*. St. Petersburg, 2017. P. 19.
10. *Lang I., Firsov Y.A.* Kinetic theory of semiconductors with low mobility // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1963. Vol. 16. No 5. P. 1301.
11. *Berkolaiko G., Kuchment P.* Introduction to quantum graphs. Providence, 2014. – 270 p.
12. *Serio A. et al.* Quantum graphs: spectrum and magnetic fields: Master's dissertation. Padova, 2014. – 31 p.
13. *Kovaleva M.O.* On the Molchanov's condition for the spectrum discreteness of the quantum graph Hamiltonian // *Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems: Book of Abstracts*. St. Petersburg, 2014. P. 11.
14. *Kovaleva M.O., Popov I.Y.* On the spectrum discreteness of the quantum graph Hamiltonian with δ -coupling // 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint Petersburg OPEN 2015". Book of abstracts. St. Petersburg, 2015. P. 279–280.
15. *Smolkina M.O., Popov I.Y.* On the spectrum discreteness of the quantum graph Hamiltonian with delta-coupling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 643. P. 012099.
16. *Cabib D., Callen E.* Charge order and antiferromagnetic order in the Hubbard model with nearest-neighbor Coulomb interaction: weak coupling // *Physical Review B*. 1975. Vol. 12.No 11. P. 5249.



Соловьева Галина Александровна
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра мехатроники
E-mail: ymatem@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ КЕВЛАРОВЫХ НИТЕЙ

Г.А. Соловьева

Научный руководитель – профессор В.М. Мусалимов

В настоящее время широкое распространение среди конструкционных материалов получили ориентированные полимеры, которые могут использоваться в качестве несущих элементов конструкций. Высокопрочные жесткоцепленные полимеры находят свое применение во многих областях промышленности.

Нити, созданные из кевларовых волокон, входят в состав различных видов технического текстиля: тяжело нагруженных текстильных материалов и изделий, средств страховки, спасения и безопасности (страховочные пояса, канаты, тросы, ленты, гибкие лестницы и т. д.); изделий баллистической защиты и резинотехники (тяжелые шины, приводные ремни, шланги высокого давления и т. д.), высокопрочных композитов. Тросы и канаты из кевларовых нитей необходимы при проведении глубоководных работ при подъеме затонувших судов или аппаратов со сверхбольших глубин, кроме того, они используются в качестве грузонесущих жил в электрических и оптико-волоконных кабелях.

В Санкт-Петербургском филиале ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН) кевларовые нити Русар® (ОАО «Каменскволокно», Россия) применяются при производстве упругого анизотропного торсиона, который используется в качестве оси вращения индикаторного магнита магнитостатического вариометра, входящего в состав геофизического комплекса *GI-MTS-1* (СПбФ ИЗМИРАН). [1, 2].

Чтобы усовершенствовать торсионные приборы, необходимо знать физико-механические характеристики торсиона: модуль упругости при растяжении, модули кручения и сдвига, от которых в большей мере зависит чувствительность измерительной системы. Немаловажную роль при разработке и усовершенствовании подобных изделий играет исследование механизма разрушения торсионов, а именно кевларовых нитей, из которых он состоит.

На основании сказанного выше была сформулирована цель научно-исследовательской работы – исследование механизма разрушения кевларовых нитей путем проведения испытаний на растяжение и фотосъемки образцов в процессе деформации. В качестве объекта исследований был выбран упругий торсион, представляющий собой спирально-анизотропный стержень, состоящий из трех кевларовых нитей. Процесс записывался высокоскоростной камерой. Полученные видеокadres обрабатывались с помощью алгоритмов технического зрения, реализованных в программной среде *MatLab*.

Учитывая геометрические параметры объекта исследования, было решено использовать специфические методы фото- и видеосъемки. На рис. 1 представлена выбранная для этой цели оптико-механическая схема.

Испытания на растяжение проводились в соответствии со стандартом *ASTM-D7269/D7269M* «Стандарт на методы испытаний на растяжение арамидных нитей». Скорость деформации составляла 25 мм/мин.

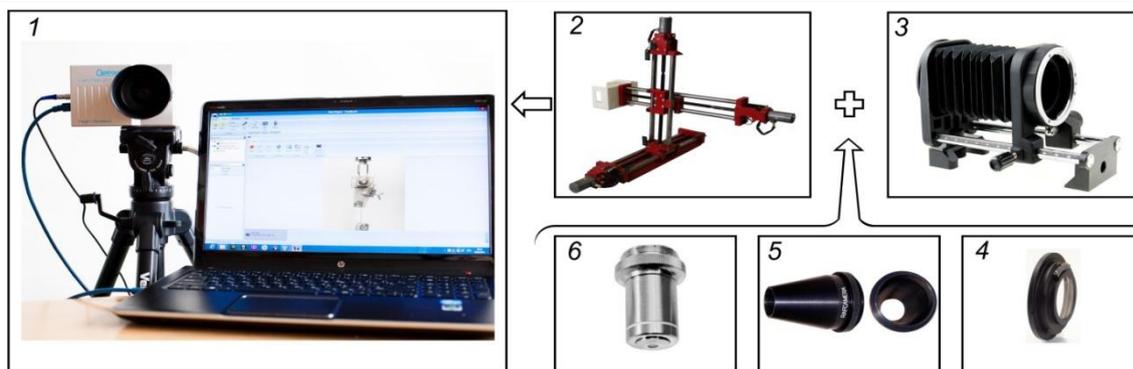


Рис. 1. Структурная схема видеорегистрации процесса растяжения: скоростная камера (1) фирмы Optronis CR450x3 и ПК; управляемая платформа позиционирования для фокусировки при микросъемке (2); меха, предназначенные для увеличения рабочего отрезка камеры до 200 мм (3); переходное кольцо с Nikon F на M42 (4); механический адаптер с резьбой RMS и стандартной M42 (5); объектив (6)

Диаграмма «напряжение – деформация» для одного образца упругого торсиона приведена на рис. 2. Полученная зависимость близка к линейной. Появление максимумов и минимумов на диаграмме отражают поведение спирально-анизотропного тела в условиях стесненного растяжения: при нагружении образца происходит его раскручивание, и напряжение, действующее на образец, падает.

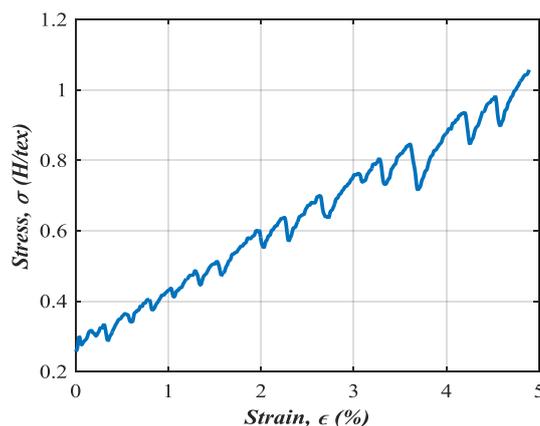


Рис. 2. Диаграмма «напряжение – деформация» для образца упругого торсиона

Фотоснимки, полученные в результате проведения испытаний, подвергались компьютерной обработке с целью определения динамики изменения угла наклона витков упругого торсиона в процессе растяжения. В основу алгоритма определения угла наклона витков упругого торсиона заложены метод сегментации изображения и преобразование Хафа (рис. 3). Математически угол наклона определяется как значение арккосинуса скалярного произведения нормализованных векторов витка и базы.

Алгоритм программы включает следующие этапы:

- чтение изображения упругого торсиона, полученного в результате испытаний, и его первичную обработку;
- определение центральной оси (базы) упругого торсиона;
- сегментацию витков упругого торсиона;
- определение осей (векторов) для значимых витков упругого торсиона;
- вычисление угла наклона витков (угла между нормализованными векторами витков и базой упругого торсиона);
- вывод результата.

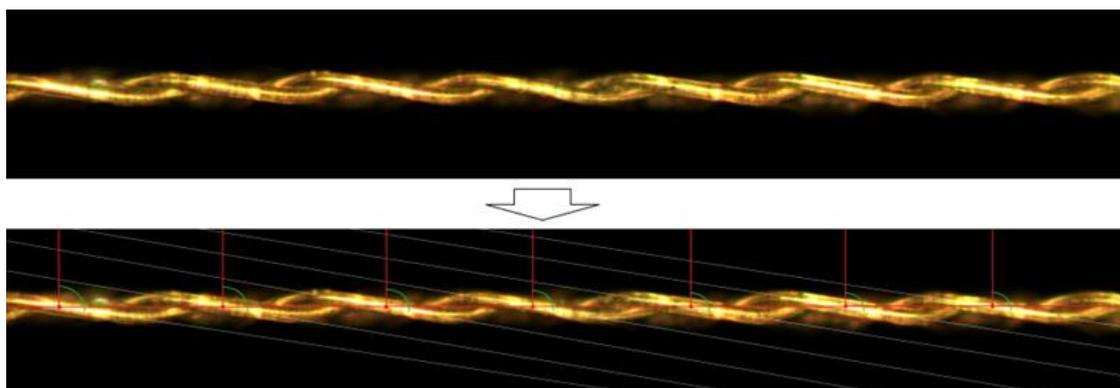


Рис. 3. Иллюстрация работы алгоритма определения угла наклона витков торсионного подвеса

На первом этапе происходит загрузка изображения в память программы и преобразование формата его представления, которое включает выявление областей с лучшей освещенностью, бинаризацию изображения по пороговому значению, определенному по гистограмме яркости, и преобразование размеров изображения.

На втором этапе выбирается ось (база) упругого торсиона, которая в дальнейшем будет выступать в качестве одного из векторов для определения угла наклона витков. Выполнение данной операции основано на преобразовании Хафа, осуществляющем отображение пространства изображения в пространство параметров кривой [3], а именно для детектирования прямой линии.

Далее на изображении методами сегментации выделяются отдельные витки образца торсионного подвеса. В качестве методов сегментации применяются алгоритм поточечной сегментации изображения на основе текстурных признаков, полученных с помощью энергетических карт Лавса [4], и алгоритм сегментации изображения на основе порогового значения яркости.

После проведения сегментации на изображении остаются только отдельные витки образца, для которых на основе преобразования Хафа детектируются прямые, представляющие собой собственные вектора витков образца.

На последнем этапе вычисляется угол наклона витков образца, который определяется как значение арккосинуса скалярного произведения нормализованных векторов витка и базы.

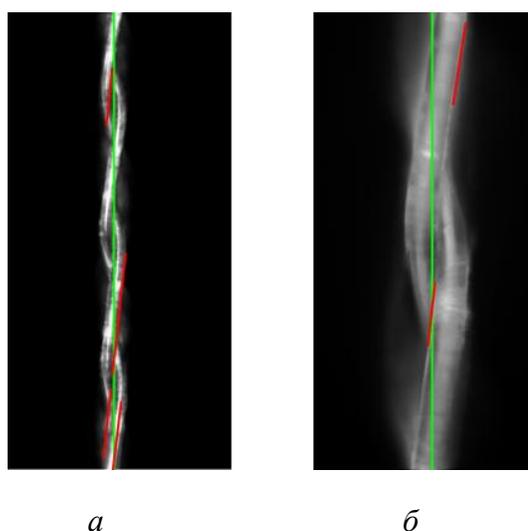


Рис. 4. Результаты работы алгоритма с изображениями торсионного подвеса, полученные: а – с 25-кратным; б – 50-кратным увеличением

В результате работы программы составляется таблица, содержащая значения углов наклона каждого витка, находящегося в кадре, по каждому изображению в серии. Дополнительно может быть выведено графическое отображение векторов оси образца и витков и углов между ними для требуемого кадра. На рис. 4 изображены результаты работы алгоритма с различными изображениями.

По результатам обработки изображений, полученным в процессе испытаний, был построен график изменения угла наклона винтовых элементов упругого торсиона во времени (рис. 5).

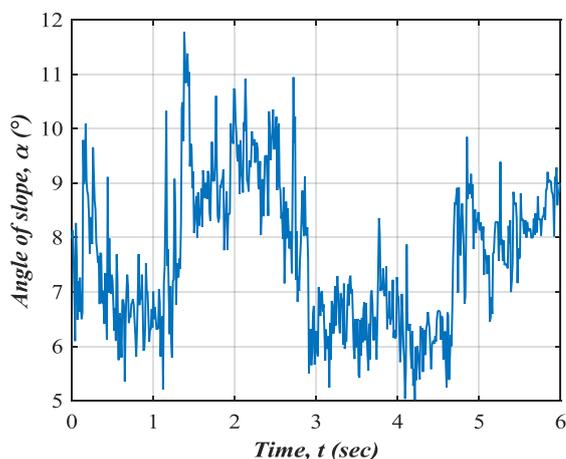


Рис. 5. График изменения угла наклона винтовых элементов образца во времени

Наибольший интерес представляют углы наклона винтовых элементов упругого торсиона в моменты достижения максимумов напряжения, поскольку именно эти значения соответствуют раскручиванию образца при приложении нагрузки. На рис. 6 показаны значения углов, соответствующие максимумам напряжения на диаграмме «напряжение – деформация», и кривая, описывающая зависимость этих значений от времени.

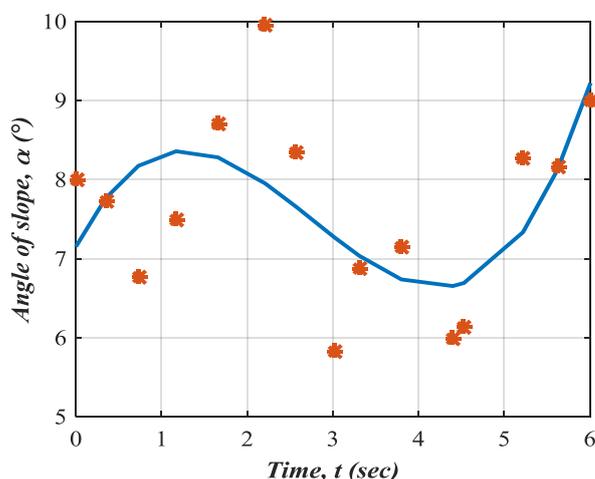


Рис. 6. Диаграмма «напряжение – деформация» для одного образца

Заключение

В рамках научно-исследовательской работы была сформулирована и решена задача по исследованию механизма разрушения торсионного подвеса путем проведения испытаний на растяжение и фотосъемки образца в процессе деформации.

Для решения поставленных задач был выполнен комплекс научно-исследовательских работ, включающий:

- разработку и программную реализацию алгоритма распознавания структурных изменений поверхностей плетеного образца;
- испытания образцов упругих торсионов.

Таким образом, все цели, которые ставились в работе, были достигнуты. Подготовлена база для дальнейшего развития подходов к решению возникающих проблем и использованию полученных результатов на практике.

Публикации

1. Соловьева Г.А. Двухпараметрический механизм разрушения нитей [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2004/2004.pdf> (дата обращения: 13.10.2016).
2. Перечесова А.Д., Каланышина И.И., Соловьева Г.А. Метод определения физико-механических параметров арамидных торсионов // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 8. С. 645–650.
3. Соловьева Г.А. Study kevlar deformation principle by system of technical // Proceedings of the 16th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Doctoral School of Energy and Geotechnology, January 16–21, 2017, Parnu / Faculty of Power Engineering, Tallin University of Technology, IET – 2017, P. 193–196.
4. Соловьева Г.А. Распределение напряжений в полом спирально-анизотропном цилиндре [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3530/3530.pdf> (дата обращения: 13.10.2016).
5. Соловьева Г.А. Проведение испытаний на растяжение арамидных нитей на основе ГОСТ 6611.2-73 и ASTM D7269/D7269M // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. – СПб.: Университет ИТМО, 2014. С. 374–376.
6. Соловьева Г.А. Применение метода текстурных карт Лавса для обнаружения поверхностных макродефектов // Приволжский научный вестник. 2014. № 9 (37). С. 22–25.

Литература

1. Перечесова А.Д. Экспериментальное определение физико-механических характеристик кевларовых нитей // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 394–395.
2. Sergushin P.A. et al. The torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // Proceedings of ISMTII-2009: The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Saint-Petersburg, 2009. Vol 4. P. 411–414.
3. Princen J.P. et al. A formal definition of the Hough transform: properties and relationships // Journal of Mathematical Imaging and Vision. 1992. Vol. 1. No 1. P. 153–168.
4. Соловьева Г.А. Применение метода текстурных карт Лавса для обнаружения поверхностных макродефектов // Приволжский научный вестник. 2014. № 9 (37). С. 22–25.



Степанова Ксения Андреевна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра технологий интроскопии
E-mail: ledy.xs93@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

К.А. Степанова

Научный руководитель – кандидат технических наук И.Ю. Кинжагулов

Введение

В настоящее время одной из перспективных технологий получения неразъемных соединений, внедряемой в различные отрасли, в том числе в авиастроение, ракетостроение и судостроение, является сварка трением с перемешиванием (СТП).

Тенденция внедрения СТП при создании ответственных изделий ракетно-космической техники (РКТ) обусловлена возможностью получения более прочных соединений наряду со снижением веса конструкции в целом, повышения автоматизации сварочного процесса и оперативности. Также активно ведутся работы в области доработки технологии СТП для получения соединений разнородных металлических материалов. Процесс СТП реализуется при жестком контроле параметров сварки: скорости, частоты вращения сварочного инструмента, усилия на него, величины внедрения наконечника сварочного инструмента в свариваемые кромки. Незначительное отклонение одного из указанных параметров может привести к появлению дефектов и снижению прочности сварного соединения.

Цель работы – повышение качества контроля изготовления соединений СТП за счет применения акустико-эмиссионного (АЭ) метода контроля дефектообразования в процессе их формирования. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ особенностей применения АЭ-метода в задаче контроля дефектообразования при формировании соединений СТП при изготовлении крупногабаритных модулей ракет-носителей (РН) «Ангара».
2. Разработана модель распространения акустических сигналов при образовании дефектов в процессе формирования соединений СТП.
3. Разработана локационная схема АЭ-контроля процесса дефектообразования при формировании соединений СТП.
4. Проведена экспериментальная апробация локационной схемы АЭ-контроля.
5. Разработана методика АЭ-контроля дефектообразования в процессе формирования соединений СТП.

Анализ применимости метода акустической эмиссии в задаче контроля дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием

Одним из перспективных методов неразрушающего контроля (НК), применимым в динамических системах, является метод акустической эмиссии. Он обладает высокой чувствительностью к дефектам, возникающим при нарушении технологии производства, позволяет определять их координаты и размеры, а также проводить оперативный контроль качества изготовления соединений, выполняемых методом СТП.

В ходе анализа применимости методов НК в задаче контроля качества сварных соединений, получаемых СТП, была выдвинута гипотеза о возможности применения метода акустической эмиссии (АЭ). Он основан на регистрации параметров сигналов упругой механической волны ультразвукового диапазона, возникающей в результате локальной динамической перестройки структуры материала диагностируемого изделия.

В ходе формирования сварного соединения по технологии СТП тонкостенная оболочечная конструкция (обечайка) находится в условиях изменения напряженно-деформированного состояния (НДС), вызванных давлением опорного бурта сварочного инструмента и изменением его положения относительно секторов кольца противодействия (рис. 1). При этом в оболочке в области действия сосредоточенной силы возникает упругая деформация, которая восстанавливается при перемещении опорного бурта в ходе сварочного процесса. Изменение НДС приводит к локальной динамической перестройке структуры материала вблизи поверхности дефекта.



Рис. 1. Схема деформирования обечайки вследствие воздействия сварочного инструмента

В случае образования дефектов типа «*kissing bond*», характерных для соединений, выполненных СТП и имеющих малое раскрытие (менее 1 мкм), либо не имеющих раскрытия вообще, возникновение нормальных и касательных напряжений, действующих по трем взаимно перпендикулярным сечениям, приводит к трению поверхностей данного дефекта, которое сопровождается излучением механических волн ультразвукового диапазона — наблюдается явление АЭ [1, 2].

При адекватном выборе схемы локации можно регистрировать АЭ-сигналы преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) для последующей обработки и анализа. Однако для успешного использования АЭ как метода исследования обозначенной проблемы необходимы детальное изучение этого явления и идентификация источников акустической эмиссии [3].

Разработка модели распространения акустических сигналов при образовании дефектов в процессе формирования соединений сваркой трением с перемешиванием

Для формирования требований к базовым параметрам модели распространения акустических сигналов при образовании дефектов в процессе формирования соединений СТП были проведены предварительные экспериментальные исследования изменения параметров АЭ при развитии и накоплении концентраторов напряжений в сварных соединениях.

Анализ их результатов, полученных при регистрации АЭ-сигналов при нагружении образцов сварных соединений (рис. 2), показал, что активность АЭ проявляется уже в области упругих и упругопластических деформаций (область 2), не достигающих предела текучести. Максимальное значение энергии АЭ-сигналов соответствует достижению максимальных деформирующих напряжений в области действия сил упругости [4]. Далее с началом пластического течения в образце без дефекта в сварном соединении акустическая активность быстро снижается, тогда как для образца с дефектом область 3 охарактеризована наличием действующих источников АЭ, соизмеримых по энергии с источниками АЭ

в области 2. Следующий пик активности АЭ (область 4) наблюдается незадолго до разрушения образца. Эта область соответствует зарождению и распространению магистральной трещины, рост которой приводит к разрушению образца. Об этом свидетельствует появление высокоэнергетических всплесков АЭ.

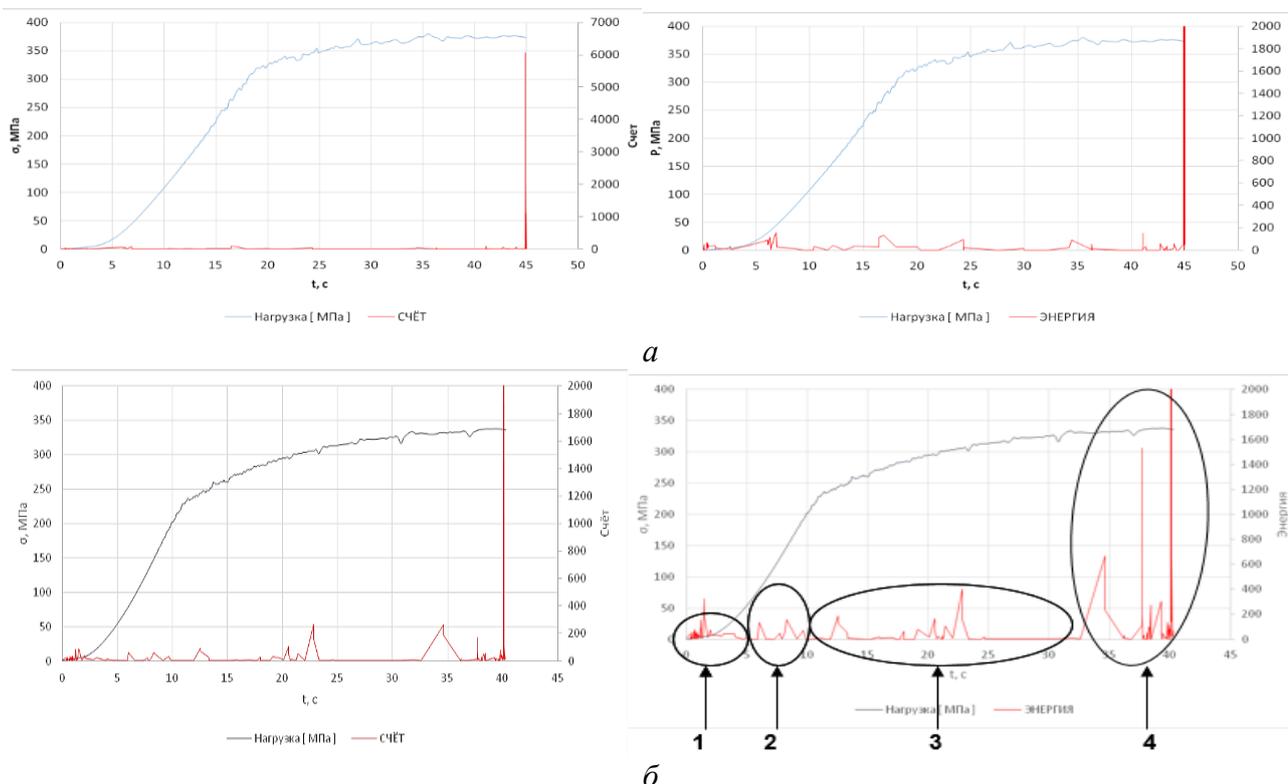


Рис. 2. Диаграммы нагружения и распределения параметров АЭ-сигналов по времени: а – образца без дефекта; б – образца с дефектом «непровар в корне шва»

Разработка локационной схемы акустико-эмиссионного контроля процесса дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием

При разработке локационной схемы акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования сварных соединений, исходя из особенностей оборудования, реализующего технологию СТП, были решены следующие задачи:

- выполнен анализ конструктивных особенностей объекта контроля;
- выполнен анализ акустических свойств объекта контроля;
- разработаны схемы расположения ПАЭ на объекте контроля;
- выполнена расстановка ПАЭ на объекте контроля с обеспечением надежной фиксации в течение всего времени проведения контроля;
- выполнена настройка и калибровка средств АЭ-контроля с учетом влияния помех при регистрации сигналов, вызванных шумами технологического оборудования и конструктивными особенностями закрепления свариваемых изделий.

Локационная схема АЭ-контроля представляла собой антенну из ПАЭ, реализующую линейную локацию координат источников АЭ. Выбор такой схемы обусловлен необходимостью обеспечения контакта чувствительных элементов ПАЭ и их надежной фиксацией к объекту контроля, а также ограничениями, вызванными конструктивными особенностями оборудования, реализующего технологию СТП. При разработке локационной схемы были учтены следующие ключевые факторы:

- отсутствие в ходе контроля механического воздействия на ПАЭ;

- обеспечение непрерывности акустического тракта на пути следования АЭ-сигналов от источников до ПАЭ;
- превышение зарегистрированными в ходе контроля АЭ-сигналами порогового уровня дискриминации АЭ-аппаратуры.

Настойка средств АЭ-контроля осуществлялась с учетом влияния помех при регистрации АЭ-сигналов, вызванных шумами технологического оборудования и конструктивными особенностями закрепления свариваемых изделий. Проверка чувствительности АЭ-аппаратуры осуществлялась с использованием стандартного имитатора Су-Нельсона. При подготовке карт к сварке была осуществлена регистрация АЭ-сигналов, вызванных механическими шумами технологического оборудования. Проведен анализ параметров зарегистрированных сигналов, по результатам которого установлен пороговый уровень дискриминации сигналов АЭ-аппаратурой (63 дБ), коэффициент усиления полезных сигналов (40 дБ) и частотный фильтр (100–600 кГц), исключающий низкочастотные составляющие АЭ-сигналов, вызванные механическим шумом и вибрациями составных частей оборудования.

В ходе экспериментальной апробации локационной схемы АЭ-контроля процесса дефектообразования при формировании соединений СТП были решены следующие задачи:

- выполнен анализ влияния изменения параметров режимов сварочного процесса на параметры АЭ-информации, зарегистрированной с использованием разработанной локационной схемы контроля;
- выполнен анализ информативных параметров АЭ-сигналов, чувствительных к изменению параметров сварочного процесса;
- выполнен анализ информативных параметров АЭ-сигналов, чувствительных к структурным изменениям, происходящим в процессе формирования соединений СТП.

Программа экспериментальных исследований включала четыре этапа:

- подготовительный;
- исследование влияния изменения параметров сварочного процесса на параметры АЭ-информации, зарегистрированной в процессе формирования соединений СТП;
- исследование изменения параметров АЭ-сигналов при моделировании процесса дефектообразования в ходе формирования соединений СТП;
- анализ результатов.

На подготовительном этапе была проведена запись АЭ-сигналов, генерируемых источниками АЭ, связанными с механическими вибрациями оборудования и другими технологическими операциями. Далее был выполнен сварной шов, при формировании которого осуществлялся АЭ-контроль.

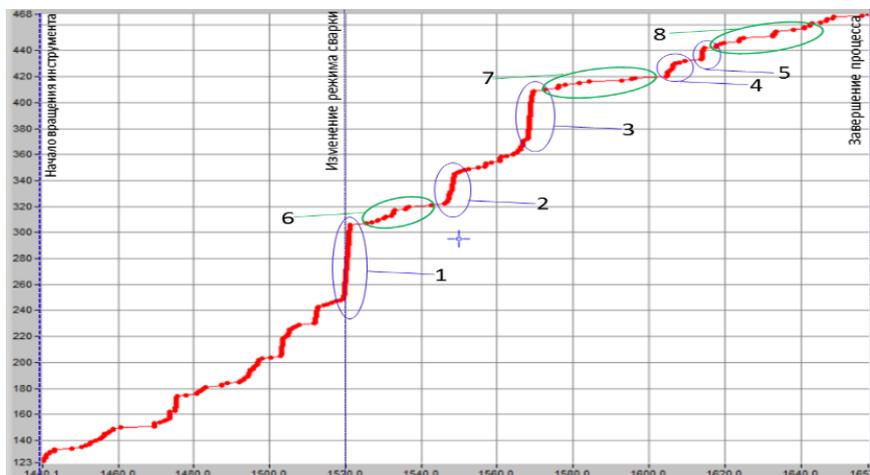


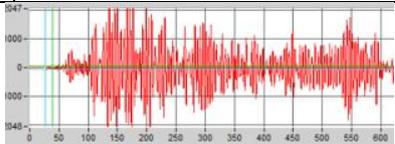
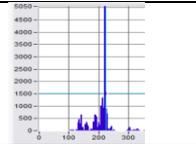
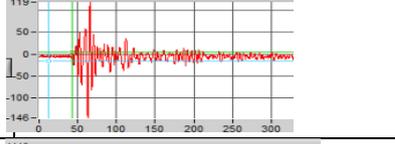
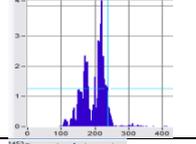
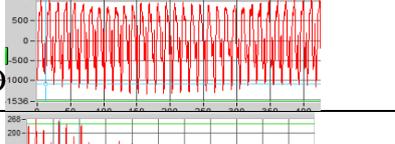
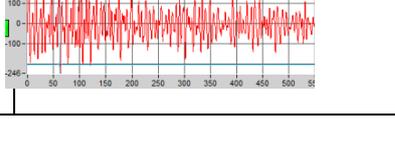
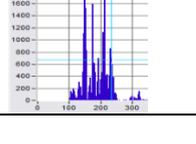
Рис. 3. Суммарный счет АЭ по времени

График зависимости суммарного счета АЭ от времени (рис. 3) свидетельствует об относительно равномерном распределении скорости счета АЭ-сигналов до момента изменения параметров сварочного процесса. После изменения режима сварки зарегистрированы области повышенной активности АЭ (поз. 1–5) и области низкой активности АЭ (поз. 6–8). Наибольшая активность АЭ зарегистрирована в момент изменения параметров сварочного процесса (поз. 1).

В процессе эксперимента также был выполнен анализ форм АЭ-сигналов и их спектральных характеристик, позволивший выделить классификационные признаки АЭ-сигналов (Таблица), которые легли в основу методики АЭ-контроля дефектообразования при формировании соединений СТП, позволяющую осуществлять оперативную оценку их качества.

Таблица

Классификация источников АЭ при контроле дефектообразования

№	Тип сигнала	Форма сигнала	Спектр сигнала
1	Высокоамплитудные сигналы с характерной АЭ-формой		
2	Сигналы низкой амплитуды и малой длительности, характеризующие процессы дискретной АЭ		
3	Низкочастотные сигналы средней амплитуды, высокой длительности, характеризующие процессы непрерывной АЭ		
4	Сигналы низкой амплитуды с отсутствием выраженного переднего фронта, характеризующие механический шум технологического оборудования		

Заключение

В результате выполненных исследований были получены следующие результаты:

- сформулированы основные требования к средствам АЭ-контроля;
- показано, что для получения достоверных результатов контроля необходимо разработать локационную схему, учитывающую особенности процесса СТП и объекта контроля;
- разработана модель распространения акустических сигналов при образовании дефектов в процессе формирования соединений СТП;
- разработана локационная схема АЭ-контроля процесса дефектообразования при формировании соединений СТП;
- выполнена экспериментальная апробация локационной схемы АЭ-контроля дефектов, образующихся при формировании соединений крупногабаритных модулей перспективных РН методом СТП. Стыковые сварные соединения из алюминиевых сплавов выполнялись на опытной сварочной установке;
- разработана методика АЭ-контроля дефектообразования при формировании соединений методом СТП.

Разработанные локационные схемы, алгоритмы контроля дефектообразования, а также определения координат дефектов на основе анализа информативных параметров АЭ-метода

контроля лягут в основу технологии АЭ-контроля дефектообразования при формировании соединений сваркой трением с перемешиванием.

Публикации

1. Степанова К.А., Могутов Т.С., Богоцкая А.С., Кинжагулов И.Ю. Результаты экспериментальных исследований процесса дефектообразования в процессе формирования соединений сваркой трением с перемешиванием с применением метода акустической эмиссии // Сборник тезисов IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest. Томск, 2017. С. 76.
2. Степанова К.А., Кинжагулов И.Ю. Разработка технологии оперативного неразрушающего акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования соединения сваркой трением с перемешиванием // Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке: IX Международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы». Тезисы конференции. Новосибирск, 2016. С. 215–216.
3. Степанова К.А., Алифиренко Е.А., Кинжагулов И.Ю., Ашихин Д.С., Богоцкая А.С. Анализ применимости метода акустической эмиссии при контроле формирования соединений сваркой трением с перемешиванием в реальном масштабе времени // Сборник тезисов XVI Конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». СПб., 2017. С. 30.
4. Степанова К.А., Кинжагулов И.Ю. Опыт применения акустико-эмиссионного контроля в задачах оценки текущего состояния элементов ракетно-космических комплексов // Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке: IX Международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы». Тезисы конференции. Новосибирск, 2016. С. 214–215.
5. Кинжагулов И.Ю., Степанова К.А. Комплексное применение методов НК в задаче контроля и оценки физико-механических свойств конструкционных материалов // Территория NDT. 2017. № 1. С. 34–37.

Литература

1. Xiaoqi Ch. et al. In-process tool monitoring through acoustic emission sensing: SIMTech technical report. Singapore, 2001. – 9 p.
2. Subramaniam S. et al. Acoustic emission-based monitoring approach for friction stir welding of aluminum alloy AA6063-T6 with different tool pin profiles // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 3. No 227. P.407–416.
3. Rajashekar R., Rajaprakash B.M. Development of a model for friction stir weld quality assessment using machine vision and acoustic emission techniques // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2016. Vol. 2. No 242. P. 207–216.
4. Поляков В.В. и др. Физические методы диагностики сварных соединений в алюминиевых сплавах. Часть 2. Акустическая эмиссия // Известия Алтайского государственного университета. 2015. Т. 1. № 1 (85). С. 50–54.



Ходунова Ольга Сергеевна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра прикладной биотехнологии
E-mail: olga.xodunowa@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ НОВОГО ВИДА МЯГКОГО СЫРА С ПРОРОЩЕННЫМИ СЕМЕНАМИ ОВСА

О.С. Ходунова

Научный руководитель – доцент Л.А. Силантьева

Цель работы – определение функциональной активности нового вида мягкого сыра с пророщенными семенами овса.

Задачи исследования:

- изучение изменения антиоксидантной активности (АОА) разработанного продукта по сравнению с традиционным;
- анализ изменения количества незаменимых аминокислот в исследуемом продукте по сравнению с контрольным образцом;
- определение содержания витаминов и минеральных веществ в разработанном продукте.

Подготовку зерновой добавки осуществляют следующим образом.

Семена овса, пригодные для проращивания, промывают чистой водой, замачивают при температуре 15–25 °С на 8–10 часов и проращивают в течение 4-5 суток.

Для обработки семян овса используют раствор хитозана, который представляет собой линейный полисахарид, полученный путем деацетилирования хитина, длинноцепочечного полимера N-ацетилглюкозамина, естественным образом присутствующего в клеточных стенках грибов и бактерий, экзоскелете членистоногих и ряда других беспозвоночных.

В научной литературе [1, 2] указывается, что низкомолекулярные хитозаны при рН ниже 6,0 находятся в оптимальных условиях для осуществления желательных антимикробных, антиокислительных и консервирующих действий в пищевых продуктах. Кроме антибактериальной и фунгицидной активности, хитозан и его производные обладают широким спектром биологических эффектов: адсорбционными, антиоксидантными, противоопухолевыми, антихолестеринемическими и иммуноадьювантными свойствами.

В качестве растворителя хитозана используют янтарную кислоту, известную своими антимикробными и антиоксидантными свойствами.

Для обеспечения микробиологической безопасности пророщенные семена овса погружают на 60 минут в раствор хитозана с концентрацией 0,1–0,5 % в однопроцентном растворе янтарной кислоты при комнатной температуре с периодическим перемешиванием. Дезинфицированные семена промывают стерильной дистиллированной водой, высушивают в сушильном шкафу при температуре 45 °С до содержания влаги 14 %. Влажность пророщенных семян определяют высушиванием в сушильных шкафах при температуре (140±2) °С в течение 40 минут с предварительным подсушиванием при температуре (105±2) °С в течение получаса. Высушенные пророщенные семена овса измельчают на лабораторной мельнице до размера частиц не более 1 мм.

Мягкий сыр с пророщенными семенами овса изготавливают в соответствии со следующей технологией.

Нормализованное молоко пастеризуют при температуре 72–74 °С с выдержкой 20–25 с и охлаждают до температуры 34 °С. Затем в него вносят закваску на мезофильных молочнокислых стрептококках, хлористый кальций в виде 40 % раствора, из расчета 40 г безводной соли на 100 кг молока, пророщенные семена овса в количестве 4–6 % от массы готового продукта и раствор сычужного фермента в заранее рассчитанном количестве. Полученный сгусток разрезают, вымешивают, оставляют на самопрессование. Посолку сыра осуществляют в рассоле.

Проведенные ранее исследования показали, что внесение пророщенных семян овса в количестве более 6 % нецелесообразно из-за нежелательного изменения органолептических свойств готового продукта. Было определено, что массовая доля пророщенных зерен овса, оптимальная для достижения необходимых органолептических, физико-химических и технологических свойств, равна 4–6 %.

Одной из характеристик биологической ценности продукта является его АОА. Это чрезвычайно важный показатель, который свидетельствует о наличии веществ, нейтрализующих избыток свободных радикалов и прерывающих цепь окислительных реакций, повреждающих клетки и ткани нашего организма.

Было определено, что суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов в исходных (сухих) семенах овса составляет 34 мг на 100 г, а в проростках на вторые и пятые сутки после начала процесса – 65 и 334 мг/100 г соответственно. Также установлено, что максимальное содержание флавоноидов в проростках достигает максимума на четвертые и пятые сутки проращивания и составляет 0,12–0,16 мг/г в пересчете на аскорбиновую кислоту [3].

Так как хитозан и янтарная кислота, используемые для обработки зерновой добавки, также обладают антиоксидантными свойствами, то и АОА мягкого сыра с пророщенными семенами овса выше контрольного образца.

Таблица 1

Аминокислотный состав семян овса до и после проращивания

Аминокислоты	Содержание аминокислот, мг/г белка	
	Непророщенный овес	Пророщенный овес
Незаменимые аминокислоты		
Изолейцин	41	48
Лейцин	72	86
Лизин	38	39
Фенилаланин	56	98
Треонин	52	97
Триптофан	15	19
Валин	23	37
Метионин	27	54
Заменимые аминокислоты		
Аспарагиновая кислота	80	185
Аргинин	18	25
Серин	52	86
Гистидин	23	65
Глютаминовая кислота	174	362
Глицин	40	96
Пролин	12	20
Аланин	52	98

При проращивании семян происходит интенсивный гидролиз высокомолекулярных соединений до низкомолекулярных и перевод их в растворимое состояние, доступное для подачи в развивающийся росток, что приводит к изменению состава зерна [4]. В результате увеличения активности ферментов протеаз, белки разлагаются до аминокислот, которые частично усваиваются, частично разлагаются дальше на нуклеотиды. Таким образом, белок в пророщенном зерне переходит в легкоусвояемое состояние – в нем увеличивается содержание незаменимых аминокислот (Табл. 1).

При обогащении мягкого сыра пророщенными семенами овса содержание незаменимых аминокислот в готовом продукте также увеличивается.

Было определено, что содержание витаминов, макроэлементов и микроэлементов, таких как *B1*, *B5*, *B6*, *B9*, *E* и кремния, в пророщенном овсе по сравнению с сухими увеличивается в 1,5 раза; кальция – в 3,5 раза; натрия, меди, железа, цинка и олова – в два раза, а витамина *B2* – в 5,5 раз [4].

В процессе проращивания проростки поглощают микроэлементы и другие минеральные вещества из воды. Более того, минеральные вещества в них хелатированы, то есть находятся в естественном состоянии – связаны с аминокислотами и потому хорошо усваиваются человеческим организмом.

Одно из главных свойств проростков – их способность синтезировать витамин *C*. Его содержание в семенах овса на четвертые сутки проращивания увеличивается в 8,7 раза, на пятые – в 15,7 раз (Табл. 2). Витамин *C* регулирует окислительно-восстановительные, регенерационные процессы и углеводный обмен, он является эффективным катализатором всех защитных систем организма.

Таблица 2

Содержание витамина *C* в сухих и прорастающих зернах овса

	Сухие зерна	Сутки от начала проращивания				
		1	2	3	4	5
Содержание витамина <i>C</i> (мг/100 г)	0,88	1,36	6,23	7,70	7,64	13,82

Содержание витаминов, макро- и микроэлементов в исследуемом продукте выше, чем в контрольном образце.

Таким образом, функциональная активность нового вида мягкого сыра с пророщенными семенами овса значительно выше, чем традиционного мягкого сыра.

Публикации

1. Ходунова О.С., Силантьева Л.А. Использование хитозана для обеспечения микробиологической безопасности пророщенных семян овса при получении зерновой добавки функционального назначения // Известия вузов. Пищевая технология. 2017. № 4 (358). С. 25–28.
2. Ходунова О.С., Силантьева Л.А. Влияние различных способов обработки на микробиологические показатели пророщенных семян овса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2017. № 1 (31). С. 3–8.
3. Ходунова О.С., Силантьева Л.А. Использование пророщенных зерен овса при производстве мягкого сыра // Известия вузов. Пищевая технология. 2016. № 2–3 (350–351). С. 35–37.
4. Ходунова О.С., Силантьева Л.А. Разработка состава и технологии мягкого сыра с пророщенными зернами овса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2016. № 1 (27). С. 100–106.
5. Ходунова О.С. Разработка технологии мягкого сыра с пророщенными зернами овса [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное

издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3291/3291.pdf> (дата обращения: 30.10.17).

6. *Khodunova O.S., Silant'Eva L.A.* Provision of microbiological safety of oat seed germination // *Foods and Raw materials*. 2017. Vol. 5. № 2. P. 145–150.

Литература

1. *Muzzarelli R.A.A. et al.* Current views on fungal chitin/chitosan, human chitinases, food preservation, glucans, pectins and inulin: a tribute to Henri Braconnot, precursor of the carbohydrate polymers science, on the chitin bicentennial // *Carbohydrate Polymers*. 2012. Vol. 87. No 2. P. 995–1012.

2. *Orzali L. et al.* Effect of chitosan seed treatment as elicitor of resistance to *Fusarium graminearum* in wheat // *Seed Science and Technology*. 2014. Vol. 42. No 2. P. 132–149.

3. *Мячикова Н.И. и др.* Влияние некоторых стимуляторов на проращивание семян овса // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. С. 694.

4. *Бутенко Л.И., Лугай Л.В.* Исследования химического состава пророщенных семян гречихи, овса, ячменя и пшеницы // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4. С. 1128–1133.



Четкина Александра Юрьевна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра прикладной биотехнологии
Email: aleksandra.chechetkina@mail.ru

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МЯГКОГО СЫРА ПОНИЖЕННОЙ АЛЛЕРГЕННОСТИ

А.Ю. Четкина

Научный руководитель – профессор Л.А. Забодалова

Питание – важнейшая составляющая здорового образа жизни человека. В последнее время вследствие негативного воздействия внешних факторов большое внимание уделяется разработке и производству комбинированных продуктов питания лечебно-профилактического назначения, имеющих сбалансированный состав, способствующих укреплению защитных функций организма и поддержанию адекватного гомеостаза [1]. По прогнозам специалистов Института иммунологии ФМБА России, у половины россиян в 2018 году будут проявляться симптомы той или иной формы аллергии. Еще десять лет назад аллергия была только у четверти населения страны, а сегодня – уже у трети [2].

Коровье молоко содержит более 25 различных белковых компонентов, которые могут вызвать образование антител у людей. Теоретические принципы снижения остаточной антигенности молочных белков и применение их в качестве сырья для различных отраслей промышленности рассмотрены в работах многих авторов. К одному из перспективных направлений в этой области относится разработка технологии мягкого сыра на основе комбинированного молочного сырья функциональной направленности. Одним из способов решения этого вопроса является сочетание молочного сырья, получаемого от различных

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

сельскохозяйственных животных, с сырьем растительного происхождения. Кроме этого, создание новых комбинированных продуктов позволяет экономить сырье животного происхождения, что также немаловажно.

В последние годы в структуре питания населения России, наблюдается недостаток потребления белка как в количественном, так и в качественном отношении, поэтому увеличение выпуска биологически полноценных продуктов весьма актуально в свете концепции сбалансированного питания [3].

Цель настоящего проекта – разработка рецептуры и технологии комбинированного мягкого сыра со сниженной аллергенностью, улучшенными органолептическими и реологическими характеристиками.

Исследование основано на определении показателей качества мягкого сыра из комбинированного молока-сырья с наполнителем. Материалом для исследований выступают опытные образцы мягкого сыра, которые были изготовлены в лабораторных условиях на кафедре. Для разработки оптимальной технологии производства низкоаллергенных мягких сыров на основе смеси козьего и коровьего молока с добавлением растительного компонента сначала выполнен математический расчет оптимальной рецептуры, а затем он подтвержден экспериментальным путем.

Для создания продукта функциональной направленности и для расширения ассортимента линейки мягких сыров используется растительная добавка в виде муки из экструдированного нута. Для увеличения суммарного количества водорастворимых антиоксидантов нут предварительно проращивается и подвергается экструзии.

Экструзия – процесс, совмещающий термо-, гидро- и механохимическую обработку сырья с целью получения продуктов с новой структурой и свойствами [2]. Кроме того, в результате экструзии происходят существенные изменения и текстурирование не только на клеточном уровне, но и сложные химические, микробиологические (стерилизация), физические процессы и явления [1] – образуется новая структура в виде биополимерной пищевой пены. Экструдирование бобовых позволяет облегчить процесс их перевариваемости и повысить вкусовые качества готового продукта, поскольку крахмал расщепляется на более простые, сладкие компоненты и улетучивается неприятный запах, характерный для нута [5].

Необходимо разработать рецептуру комбинированного сыра с растительным наполнителем и максимальным использованием всех компонентов молока. Оптимальные соотношения ингредиентов определяются в первую очередь по критериям пищевой, биологической и энергетической ценности при ограничениях, вытекающих из структурно-параметрических моделей адекватного питания.

Для решения поставленной задачи планируется использовать методы математического моделирования, применяемые при обосновании рецептур продуктов с заданными свойствами и составом. На основании информационной матрицы данных была сформирована система линейных балансовых уравнений – по жиру, белку, углеводам, минеральным и сухим веществам. Она решена в программе *Microsoft Excel* с использованием функции «Поиск решения». Результаты расчетов показали, что рациональным соотношением рекомендуемых ингредиентов молоко коровье : молоко козье : растительный компонент в рецептуре разрабатываемого продукта является 47,6 : 49,4 : 2,9.

На следующем этапе при отработке оптимальных параметров комбинированного мягкого сыра определялись оптимальные дозы сычужного фермента и бактериального концентрата. Исследования проводились в два этапа. В первой серии за постоянную величину было принято количество бактериального концентрата, во второй – количество вводимого ферментного препарата. При производстве образцов мягкого сыра были изучены качественные показатели сгустков, полученные при свертывании козьего и коровьего молока, а также их смесевых композиций с различными дозами вносимых компонентов.

На основании проведенных исследований разработана оптимальная технология производства мягкого комбинированного сыра пониженной аллергенности, позволяющая

создать продукт, обладающий наилучшими органолептическими показателями, а также оптимальными показателями качества.

Для подтверждения снижения аллергенности продукта аллергизирующие свойства сыров были оценены в тесте гиперчувствительности «замедленного» типа на мышах. При работе с лабораторными животными соблюдались правила гуманного обращения. К ним допускались сотрудники, имеющие специальную квалификацию и прошедшие обучение. Настоящее исследование было проведено в соответствии со стандартами, признанными в настоящий момент на международном уровне (*Animal Welfare Act, Guide for Care and Use of Laboratory Animals*). Вид экспериментальных животных выбран в соответствии с методическими указаниями по оценке аллергизирующих свойств фармакологических веществ, описанными в «Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств» (2012).

Исследуемые сыры вводились мышам перорально и субплантарно. Кратность введения и дозы зависели от конкретного теста. Объем введения был рассчитан индивидуально для каждого животного, исходя из значения показателя массы тела, полученного после последнего взвешивания.

Подопытных лабораторных мышей линии C57BL/6, независимо от групповой принадлежности, сенсibilизировали однократно, внутрикожно в основание хвоста 60 мкл эмульсии тестируемого вещества – полного адьюванта Фрейнда.

Анализ полученных данных показывает, что тестируемые сыры вызывают увеличение индекса реакции гиперчувствительности замедленного действия (ГЗТ) как через 6 часов после введения разрешающей дозы, так и через 24 часа. Однако статистически значимых межгрупповых различий выявлено не было. Можно говорить об индивидуальной чувствительности мышей к сырам: в каждой группе наблюдали значительную реакцию ГЗТ у трех-пяти мышей из десяти.

По результатам представленных исследований можно судить о снижении остаточной аллергенности мягкого комбинированного сыра с растительным компонентом.

Полученный продукт обладает более усовершенствованным составом, повышенной пищевой ценностью, улучшенными реологическими характеристиками. Продукт можно внести в сегмент функциональных молочных продуктов, популярность которых на рынке активно возрастает.

Предполагается производство разрабатываемого продукта на молокоперерабатывающих предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области как самостоятельного основного блюда, аппетитной закуске и в виде добавки к различным блюдам. Сбыт продукта предполагается наладить в торгово-продовольственных организациях и лечебно-оздоровительных учреждениях.

Публикации

1. *Chechetkina A.I., Iakovchenko N.V., Zabodalova L.A.* The technology of soft cheese with a vegetable component // *Agronomy Research*. 2016. Vol. 14. No 5. P. 1562–1572.
2. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А.* Растительные добавки как функциональный компонент при производстве мягких сыров // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. 2015. № 4 (41). С. 106–112.
3. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А., Серова О.П.* Разработка и производство сырных продуктов с растительными компонентами // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2014. № 4 (22). С. 204–209.
4. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А.* Сырный продукт ресурсосберегающей технологии // *Инновации в современном мире: сборник статей Международной научно-практической конференции*. М., 2015. С. 45–47.

5. Чечеткина А.Ю., Забодалова Л.А. Перспективы использования растительных компонентов при производстве мягких сыров // *Fundamental and Applied Science Today VI. Proceedings of the Conference. North Charleston, 2015. P. 157–159.*
6. Чечеткина А.Ю., Белякова Т.Н., Забодалова Л.А. Комплексные пищевые добавки при производстве цельномолочных продуктов // *Проблемы агропромышленного комплекса стран Евразийского Экономического Союза: материалы I Международной научно-практической конференции. Саратов, 2015. С. 239–242.*

Литература

1. Горлов И.Ф. Биологическая ценность основных пищевых продуктов животного и растительного происхождения. Волгоград, 2000. – 264 с.
2. Студеникин М.Я., Соколова Т.С. Аллергические болезни у детей. М., 2012. – 543 с.
3. Изменение качества сои в результате экструдирования [Электронный ресурс] // *Аграрный бизнес: сельскохозяйственное производство [Официальный сайт].*
URL: <http://biagroferm.ru/tech/izmenenie-kachestva-soi-v-rezultate> (дата обращения: ЧЧ.ММ.ГГ).
4. Дудкин М.С. Комплексное использование растительного сырья в пищевой промышленности // *Известия вузов. Пищевая технология. 1980. № 6. С. 7–14.*
5. Экструзия (технологический процесс) [Электронный ресурс].
URL: <http://www.mantika.lt/ru/products> (дата обращения: 10.03.2017).



Чугина Юлия Владимировна
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: chugina.yulya@mail.ru

ПРЕЦИЗИОННЫЙ АЛГОРИТМ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АПАРАТОВ

Ю.В. Чугина

Научный руководитель – доцент И.Б. Фуртат

Цель проекта – разработка регулятора, автоматически стабилизирующего аэродинамическую систему с двумя воздушными винтами, представляющую собой по структуре модель вертолета. Для решения задачи предлагается разработать алгоритм управления, обеспечивающий слежение системы за задаваемыми значениями углов ориентации аппарата путем изменения напряжения на двигателях воздушных винтов. В качестве платформы для тестирования этого алгоритма используется лабораторная установка «Двухроторная многоканальная система» (TRMS) [1], аэродинамика которой сходна с аэродинамической системой вертолета, но ограничивается движением по двум направлениям. Измерение углов производится цифровыми энкодерами.

В основе настоящей работы лежит ранее предложенный алгоритм робастного субоптимального управления линейными непрерывными объектами в условиях ограниченного возмущения [2]. Алгоритм сочетает компенсацию возмущений методом вспомогательного контура [3] и оптимизацию управления при помощи линейного квадратичного регулятора (LQR).

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

В настоящей работе исходный алгоритм модифицируется следующим образом. Во-первых, используется централизованное управление, что позволяет сохранить полезные перекрестные связи между подсистемами, связанными с хвостовым и основным винтом установки. Во-вторых, с учетом квантизации сигналов измерений используется дискретное управление. Для возможности синтеза регулятора, разработанного для линейных структур, нелинейная модель системы линеаризуется методом интервальной линеаризации [4].

Полученный результат реализуется в практическом эксперименте при помощи программного обеспечения *Simulink Real-Time* на персональном компьютере, подключенном к *TRMS 33-220*. Результаты исследований на лабораторной установке теоретически распространяемы на вертолеты различной конфигурации, подпадающие под модельные предположения алгоритма управления.

Постановка задачи. Динамика *TRMS* – непрерывная и нелинейная, подвержена влиянию возмущений. В самом общем виде обозначим ее как:

$$\dot{x}(t) = f(x), \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния. Предлагаемый в работе регулятор синтезируется на основе структуры линейной дискретной модели с определенными параметрами. Проведем ряд преобразований (1) для получения такой модели.

Модель (1) может быть сведена к линейной при помощи интервальной линеаризации [4], согласно которой если $\exists S_x : \|x(t)\| < d_s$, при $t > 0$, тогда

$$f(x) = A(x)x \subseteq [A]x, \quad (2)$$

$$\text{где } [A]_{n \times n} : [A_{ij}] = \left[\min_{x \in S_x} (f_i(x)/nx_j), \max_{x \in S_x} (f_i(x)/nx_j) \right],$$

$$A(x) = \text{row}_i \left\{ \text{col}_j \left\{ f_i(x)/nx_j, j = \overline{1, n} \right\}, i = \overline{1, n} \right\}.$$

В результате преобразования (1) сводится к линейной модели с интервальными параметрами:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A]x(t) + [B]u(t) + [D]f(t), x(0) = x_0, \\ y(t) = Lx(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $x_0 \in IR^n$ – неизвестные начальные условия, IR – множество всех интервалов из R , $f(t) \in R^k$ – ограниченный вектор внешних возмущений, $u(t) \in R^k$ – вектор сигналов управления, $y(t) \in R^k$ – вектор выходов объекта управления (ОУ), $[A] \in IR^{n \times n}$ – матрица состояния, $[B] \in IR^{n \times k}$ – матрица входов по управлению, $[D] \in IR^{n \times k}$ – матрица входов по возмущению, $L \in R^{k \times n}$ – матрица выходов с известными коэффициентами. Введем следующее модельное предположение:

Предположение 1. Для системы (3) выполняются условия структурного согласования: $[A] = A + B[c_a]$, $[B] = B[c_b]$, $[D] = B[c_d]$, где $[c_a] \in IR^{k \times n}$, $[c_b] \in IR^{k \times k}$, $[c_d] \in IR^{k \times k}$ – неизвестные интервальные матрицы; A и B – матрицы номинальной модели с известными коэффициентами.

С учетом Предположения 1, можно свести модель (3) к виду:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B\varphi(t), x(0) = x_0, \\ y(t) = Lx(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi(t) = [c_a]x(t) + [c_b]u(t) + [c_d]f(t)$. Для получения матриц дискретной модели, воспользуемся следующими формулами преобразования [5]:

$$A_d = e^{AT}, B_d = \sum_{i=1}^l \frac{A^{i-1}T^i}{i!} B, L_d = L, \quad (5)$$

где T – шаг дискретизации. Воспользовавшись (5), получаем модель (4) в дискретном виде:

$$\begin{cases} x(m+1) = A_d x(m) + B_d u(m) + B_d \varphi(m), & x(0) = x_0, \\ y(m) = L_d x(m), \end{cases} \quad (6)$$

где $x(m) = x(t_m)$ в моменты $t_m = mT$, m – номер шага.

Цель управления состоит в обеспечении следующего условия:

$$\|y(m)\| < \delta \text{ при } m > m_{уст}, \quad (7)$$

где $\delta > 0$ – точность, $m_{уст} > 0$ – количество шагов, за которое система (6) стабилизируется.

Задача оптимального управления определяется критерием:

$$\sum_{m=0}^{\infty} (y(m)Qy(m) + u_o^T(m)Ru_o(m)) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $u_o \in R^k$ – сигнал оптимального управления; $Q = Q^T \geq 0$ и $R = R^T > 0$ – весовые матрицы.

Алгоритм управления. Пусть выполнено следующее предположение.

Предположение 2. Пара (A_d, B_d) управляема, пара матриц (A_d, L_d) наблюдаема.

Закон управления будем задавать в аддитивной форме

$$u(m) = u_o(m) + u_r(m), \quad (9)$$

где $u_r \in R^k$ – робастный сигнал управления для компенсации возмущений. Закон оптимального управления будем строить в форме:

$$u_o(m) = -Gx(m),$$

где G – матрица обратных связей, рассчитываемая в силу выражения $G = (R + B_d^T P B_d)^{-1} B_d^T P$, где P – решение дискретного уравнения Риккати:

$$P = Q + A_d^T \left(P - P B_d (R + B_d^T P B_d)^{-1} B_d^T P \right) A_d. \quad (10)$$

Для рассматриваемого ОУ измерению доступен только выход модели $y(m)$, то есть реальный закон оптимального управления будет вводиться в систему в виде:

$$u_o(m) = -G\hat{x}(m). \quad (11)$$

Для получения оценки $\hat{x}(m)$ возможно использовать наблюдатель Халила. В случае применения его к многоканальной системе предварительно введем следующее предположение.

Предположение 2. Структура многоканального ОУ известна и может быть представлена конечным числом динамически связанных одноканальных подсистем, порядки

которых n_i , $i = \overline{1, k}$ известны: $\sum_{i=1}^k n_i = n$.

В непрерывной форме наблюдатель записывается в виде:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = H_o \xi(t) - M_o (\hat{y}(t) - y(t)), \xi(0) = 0, \\ \hat{y}(t) = \bar{L} \xi(t), \end{cases} \quad (12)$$

где $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_k(t)]$, $\xi_i(t) \in R^{n_i}$; $H_o = \text{blkdiag} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & I_{n_i-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, i = \overline{1, k} \right\}$;

$\bar{L} = \text{blkdiag} \{ [L, 0]_{i, i = \overline{1, k}} \}$; $M_o = \text{blkdiag} \left\{ -[d_1 \tau^{-1}, d_2 \tau^{-2}, \dots, d_{n_i} \tau^{-n_i}]^T, i = \overline{1, k} \right\}$, $\tau > 0$,

коэффициенты d_j , $j = \overline{1, n_k}$ такие, что матрица $H = H_o - M\bar{L}$ – гурвицева,

$M = \text{blkdiag} \left\{ [d_1, d_2, \dots, d_{n_i+1}]^T, i = \overline{1, k} \right\}$. Для применения к дискретному случаю модель

наблюдателя дискретизируется при помощи выражений, аналогичных (5).

Подставим полученное управление (11) в (6) и с учетом (9) получим:

$$\begin{cases} x(m+1) = A_{od} x(m) + B_d u_r(m) + B_d \psi(m), x(m) = x_0, \\ y(m) = L_d x(m), \end{cases} \quad (13)$$

где $A_{od} = A_d - B_d G$ – гурвицева матрица; $\psi(m) = \varphi(m) - B_d G \varepsilon(m)$, $\varepsilon(m) = \hat{x}(m) - x(m)$ – ошибка оценки. Для компенсации возмущения $\psi(m)$ введем вспомогательный контур [3] в виде:

$$x_a(m+1) = A_{od} x_a(m) + B_d u_r(m), x_a(0) = 0, \quad (14)$$

где $x_a \in R^n$ – вектор состояния вспомогательного контура. Из рассогласования динамик (13) и (14) можно получить выражение для $\psi(m)$:

$$\psi(m) = B_d^+ (x(m+1) - x_a(m+1) - A_{od} (x(m) - x_a(m))), \quad (15)$$

где B_d^+ – псевдообратная матрица. Исходя из полученного выражения (15), вида системы (13) и учитывая недоступность прямому измерению полного вектора состояния системы, запишем робастный закон управления:

$$u_r(m) = -B_d^+ (\hat{x}(m+1) - \hat{x}_a(m+1) - A_{od} (\hat{x}(m) - x_a(m))). \quad (16)$$

Для получения $\hat{\zeta}(m+1) = \hat{x}(m+1) - \hat{x}_a(m+1)$ воспользуемся методом скользящей аппроксимации [6], определяемой выражением:

$$\hat{\zeta}(m+1) = \sum_{i=1}^s (-1)^{i-1} C_s^i \hat{\zeta}(m-s+1), \quad (17)$$

где $C_s^i = s! / (i!(s-i)!)$ – сочетание из s по i ; $\hat{\zeta}(m) = \hat{x}(m) - x_a(m)$; $s > 1$ – выбираемая разработчиком величина. При этом чем больше s , тем точнее аппроксимация, но в то же время тем больше влияние на нее возмущений.

Полученный закон управления (9), (11), (16) обеспечивает выполнение целевых условий (7) и (8) для системы управления, состоящей из модели вида (6) и регулятора (9), структура которого представлена выражениями (11), (12), (14), (16) и (17), при условии выполнения требований Предположений 1–3.

Пример. Динамическая модель TRMS [1] описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\alpha} = -k_{f11} \dot{\alpha} - k_{f12} \operatorname{sign}(\dot{\alpha}) + gN_1 \cos \alpha - \\ -gN_2 \sin \alpha - N_3 \beta^2 \sin \alpha \cos \alpha + F_1(u_1), \\ J_2 \ddot{\beta} = -k_{f21} \dot{\beta} - k_{f22} \operatorname{sign}(\dot{\beta}) + F_2(u_2), \end{cases} \quad (18)$$

где $\alpha \in (-\pi/2, \pi/2)$ рад – угол тангажа; $\beta \in (-3\pi/4, 3\pi/4)$ рад – угол рысканья; $J_1, \text{ кг*м}^2$ – момент инерции в вертикальной плоскости; $J_2, \text{ кг*м}^2$ – момент инерции в горизонтальной плоскости; $k_{f1i}, i=1, 2$ – коэффициенты вязкого трения; $k_{f2i}, i=1, 2$ – коэффициенты трения покоя; $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $F_i(u_i), i=1, 2$ – полиномиальные функции, задающие управляющие моменты, зависящие от амплитуды напряжения в двигателях постоянного тока $u_i(t) \in [-2,5, 2,5]$ В, $i=1, 2$, $N_i, i=1, 3$ – безразмерные коэффициенты, определенные в соответствии с документацией [1].

Систему (18) в силу ограниченности переменных состояния можно привести к линейной, используя интервальную линеаризацию (2). Линеаризованная математическая модель динамики TRMS описывается системой уравнений (3). Численные значения матриц для исследуемой установки имеют вид:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ [-1753,7, 1729] & [-5,4, -0,1] & 0 & [-3,1, 3,1] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ [-0,3, 0,3] & 0 & 0 & [-1,6, 0] \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[B] = \text{blkdiag} \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ [0,173, 1,522] \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ [0,007, 0,085] \end{bmatrix} \right\}.$$

Начальные условия в силу относительности измерений энкодера при включении установки принимаются нулевыми: $x_0 = [0, 0, 0, 0]^T$. Номинальная модель ОУ получается из интервальной взятием средних арифметических значений интервалов. Для расчета матриц дискретной модели ОУ воспользуемся формулами (5), где шаг дискретизации определен в программном обеспечении лабораторной установки значением $T = 0,001$ с.

Определим цель управления TRMS как стабилизацию выхода на уровне $y_{ref} = [0,5, 0,5]^T$ рад оптимальным образом, в соответствии с критерием качества (8), где весовые матрицы зададим в виде $Q = \text{diag}\{35, 0,5\}$, $R = \text{diag}\{10, 2\}$.

Для восстановления вектора состояния ОУ используем наблюдатель Халила (12), где примем параметры равными $\tau = 0,01$ и $d_j = -3, j=1, 2$. Исходя из значений выходов ОУ $y(m) \in R^2$, измеряемых напрямую, и $\xi(m) \in R^4$, вектор $\hat{x}(m)$ можно сформировать в виде: $\hat{x}(m) = [y_1(m), \xi_2(m), y_2(m), \xi_4(m)]^T$.

Субоптимальный закон управления вычисляем согласно (11), где матрица обратной связи $G = \text{blkdiag}\{[4,453 \ 0,925], [28,274 \ 15,209]\}$. Вспомогательный контур строится согласно (14). Робастный закон управления вычисляется по выражению (16), где $\hat{x}(m+1) - \hat{x}_a(m+1)$ вычисляется аппроксиматором (17), принимающим при $s=2$ вид: $\hat{c}(m+1) = 2\hat{c}(m) - \hat{c}(m-1)$.

Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

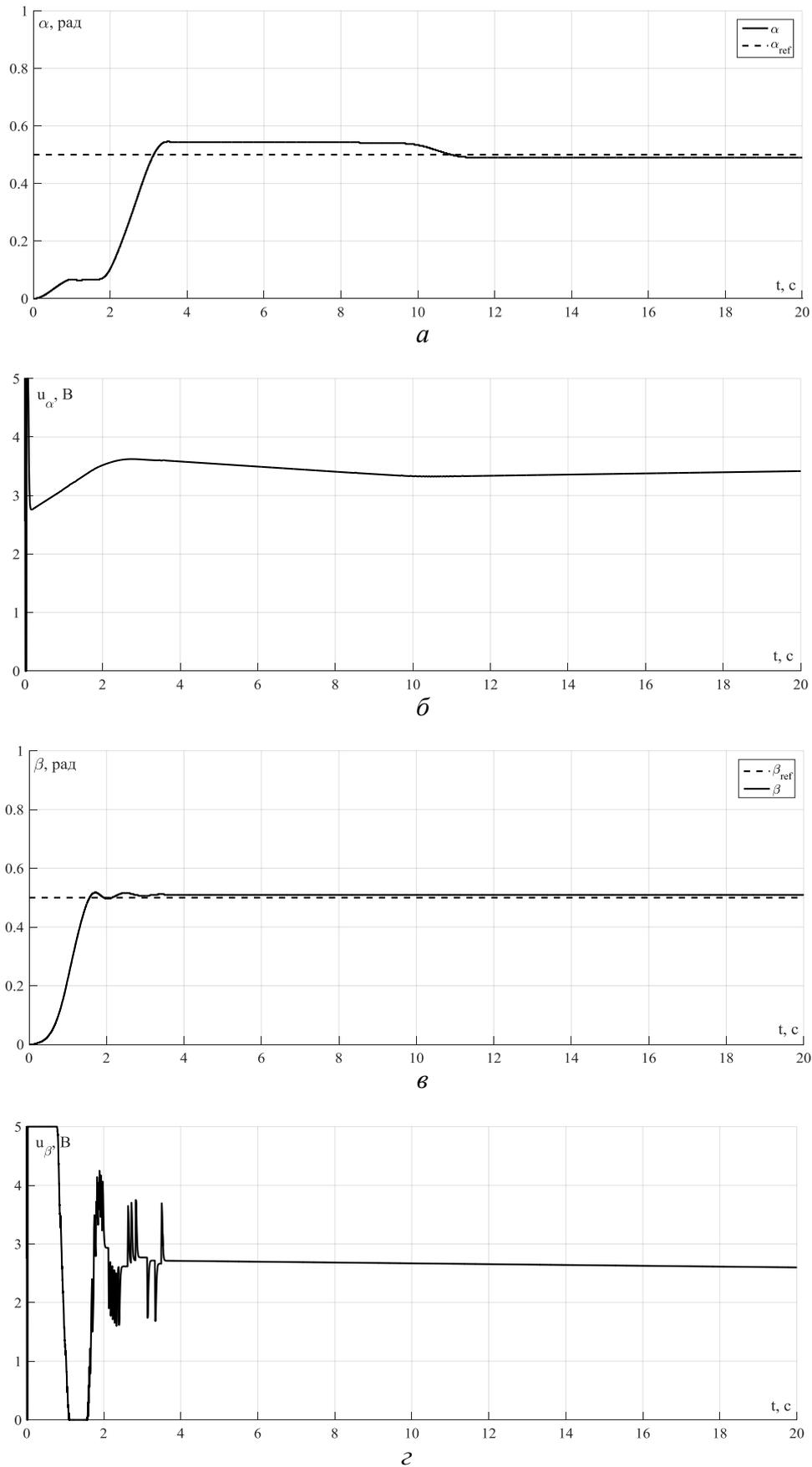


Рис. 1. Переходные процессы: а – по углу тангажа; б – по входному сигналу главного ротора; в – по углу рысканья; г – по входному сигналу хвостового ротора
Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

Регулятор обеспечивает стабилизацию с точностью $\|y(m)\| < 0,0135$ рад.

Заключение

В результате исследования получен робастный субоптимальный алгоритм управления многоканальными дискретными объектами, обеспечивающий стабилизацию управляемого объекта с высокой точностью. Данный алгоритм был применен для синтеза регулятора лабораторной установки TRMS 33-220, являющейся модельным представлением динамики движения лопастного летательного аппарата по углам тангажа и рысканья. Экспериментальная апробация иллюстрирует работоспособность алгоритма.

Алгоритм отличается простотой реализации. Для повышения качества управления можно настраивать выбираемые параметры: весовые матрицы Q и R в критерии качества оптимального управления, τ – в наблюдателе и s – в аппроксиматоре. Представленный подход позволяет сохранить полезные перекрестные связи, повышая тем самым качество управления. Эксперименты, проведенные на установке TRMS 33-220, показывают повышение быстродействия системы управления при централизованном варианте алгоритма по сравнению с децентрализованным аналогом.

Публикации

1. *Vrazevsky S.A., Chugina J.V., Furtat I.B., Kremlev A.S.* Robust suboptimal output control for a Twin Rotor MIMO System // 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Lisbon, 2016. P. 54–59.
2. *Вражевский С.А., Чугина Ю.В., Фуртат И.Б.* Робастное субоптимальное управление многоканальными объектами в условиях насыщения // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 6. С. 495–503.
3. *Vrazevsky S.A., Chugina J.V., Furtat I.B., Kremlev A.S.* Robust suboptimal output stabilization for multi input multi output plants under disturbances // 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Munich, 2017. P. 55–60.

Литература

1. Twin Rotor MIMO System. Advanced teaching manual 1 (33-007-4M5). Crowborough, 1998. – 72 p.
2. Furtat I.B. Robust suboptimal control with disturbances compensation // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). Miedzyzdroje, 2014. P. 532–537.
3. *Цыкунов А.М.* Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103–115.
4. *Дударенко Н.А. и др.* Математические основы теории систем: лекционный курс и практикум. Учебное пособие для высших учебных заведений. СПб., 2014. – 292 с.
5. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. СПб., 2003. – 752 с.
6. *Цыпкин Я.З.* Скользящая аппроксимация и принцип поглощения // Доклады Академии наук. 1997. Т. 357. № 6. С. 750–751.



Шилин Александр Сергеевич
Факультет низкотемпературной энергетики
Кафедра инженерного проектирования систем жизнеобеспечения
E-mail: 0346440@mail.ru

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

А.С. Шилин

Научный руководитель – профессор А.В. Цыганков

В условиях современного экономического кризиса актуальной считается проблема энергоресурсосбережения и повышения энергоэффективности зданий и сооружений. В целях экономии энергии, расходуемой на системы отопления, вентиляции и кондиционирования, приоритетной задачей является снижение теплопотребления зданиями и сооружениями.

Цель проекта – разработка методов и алгоритмов оптимизации технических решений систем кондиционирования воздуха общественных зданий, позволяющих повысить их энергетическую эффективность и уменьшить потребление природных ресурсов, необходимых для жизнеобеспечения.

Для достижения этих целей возможно использование следующих методов:

- анализ и совершенствование архитектурно-строительных решений конкретных зданий и сооружений;
- оптимизация систем жизнеобеспечения зданий и сооружений.

Анализ действующих нормативных документов

Энергопотребление систем жизнеобеспечения определяется поступлением теплоты в теплый период года, потерями теплоты в холодный период и энергоэффективностью этих систем. Из этого следует, что уменьшить энергопотребление систем жизнеобеспечения можно двумя способами: либо повысить энергетическую эффективность наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений, либо повысить энергетическую эффективность самих систем жизнеобеспечения. Однако для «доработки» наружных ограждающих конструкций зданий требуются значительные финансовые средства, особенно если эти здания обладают большой площадью фасадов, покрытий и перекрытий. В свою очередь, повышение энергетической эффективности систем жизнеобеспечения складывается из определения минимально-возможного расхода воздуха, затрат теплоты и холода, воды и водяного пара, электрической энергии. Оптимизация этих параметров позволяет повысить энергетическую эффективность систем жизнеобеспечения и уменьшить количество затрачиваемых ресурсов.

Здания в зависимости от их назначения и иных факторов имеют разные объемно-планировочные решения, а также разнообразные теплозащитные свойства ограждающих конструкций. В Своде правил 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [1] рассматриваются такие характеристики здания, как отапливаемый объем, показатель компактности, коэффициент остекленности фасада. Эти показатели наряду с теплотехническими характеристиками влияют на расчетный (ожидаемый) расход тепловой энергии, необходимый для отопления здания за отопительный период.

Рассмотрим комплексное требование, в котором показателем расхода тепловой энергии на отопление объекта (здания или сооружения) является значение удельной

теплозащитной характеристики (УТЗХ) здания, которая учитывает его объемно-планировочные и теплозащитные свойства. Расчетное значение УТЗХ $K_{об}$ вычисляется по зависимостям, представленным в СП 50.13330.2012 [1], как произведение общего (осредненного по площади) коэффициента теплопередачи здания $K_{общ}$ на показатель его компактности $K_{комп}$:

$$K_{об} = (K_{комп} \cdot K_{общ}), \quad (1)$$

где $K_{комп}$ – показатель компактности здания, 1/м, определяемый по формуле:

$$K_{комп} = \Sigma F / V_{от}, \quad (2)$$

где ΣF – общая (суммарная) площадь внутренних поверхностей всех наружных ограждений теплозащитной оболочки здания m^2 ; $V_{от}$ – отапливаемый объем здания, m^3 .

$K_{общ}$ – общий коэффициент теплопередачи здания, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$, рассчитываемый по выражению:

$$K_{общ} = \frac{\Sigma(F_{огр}/R_{огр})}{\Sigma F} = \frac{\frac{F_{н} + F_{ост}}{R_{н} + R_{ост}} + \frac{F_{покр}}{R_{покр}} + \frac{F_{пола}}{R_{пола}}}{\Sigma F}, \quad (3)$$

где $F_{огр}$ – площадь соответствующего фрагмента теплозащитной оболочки здания, m^2 ; $R_{огр}$ – приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания, $(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$.

Требуемое значение УТЗХ здания определяется в соответствии с требованиями Свода правил [1] по зависимости:

$$K_{об}^{тр} = \frac{0,16 + \frac{10}{\sqrt{V_{от}}}}{0,00013 \cdot ГСОП + 0,61} \quad (4)$$

При этом расчетная величина УТЗХ здания должна быть не больше нормируемого значения, которое следует принимать в зависимости от отапливаемого объема здания и градусо-суток отопительного периода района строительства. Нормируемое значение УТЗХ здания, $Вт/(m^3 \cdot ^\circ C)$, определяется по данным п. 5.5 СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [1].

Зная нормируемое значение УТЗХ здания и показатель его компактности, можно вычислить минимальную необходимую величину общего термического сопротивления здания (как величину обратную общему коэффициенту теплопередачи здания). Общее фактическое сопротивление теплопередаче здания можно увеличить, последовательно изменяя термические сопротивления отдельных фрагментов теплозащитной оболочки: прежде всего, светопрозрачных ограждений, затем перекрытий и покрытий.

Изложенные положения помогают последовательно и обоснованно анализировать теплозащитную оболочку здания. Для этого была разработана номограмма, позволяющая определять величину отклонения приведенного значения термического сопротивления ограждающих конструкций здания от требуемого значения (рис. 1). Вычислив ее, легко сформировать поэтапные мероприятия по улучшению теплотехнических свойств ограждающих конструкций здания в соответствии с требованиями Свода правил [1].

Алгоритм работы с данной номограммой следующий.

1. Зная показатель компактности здания $K_{комп}$ и фактическое сопротивление теплопередаче $R_{зд}^{\phi}$, определяем его удельную теплозащитную характеристику $K_{об}^{\phi}$.
2. Далее находим требуемое значение термического сопротивления здания $R_{зд}^{тр}$.
3. По величине отклонения фактического значения термического сопротивления здания от требуемого $\Delta R_{зд}^{тр} = (R_{зд}^{тр} - R_{зд}^{\phi})$ формируем мероприятия по доработке его теплозащитной оболочки.

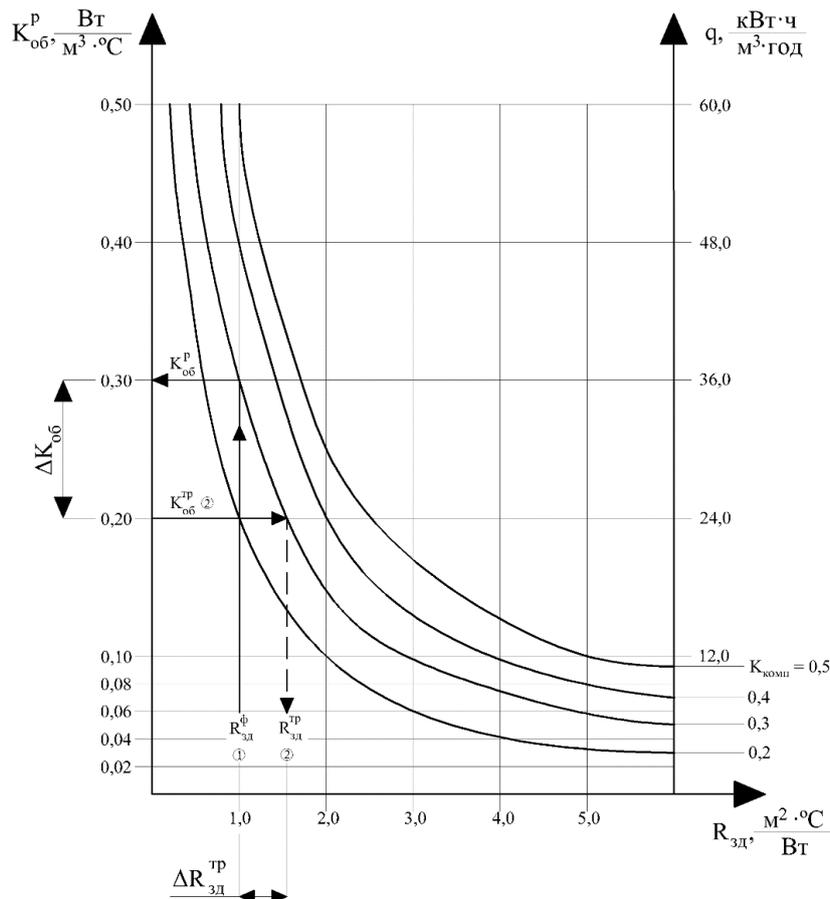


Рис. 1. Номограмма

Обобщение результатов, полученных в ходе расчетов, позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Рассматриваемая проблема является многофакторной, поэтому конечные результаты существенно зависят от исходных условий, характеризующих исследуемый объект (конкретное здание). К факторам, определяющим теплозащитные свойства здания, относятся:

- объемно-планировочные решения по конкретному зданию;
- теплозащитные свойства ограждающих конструкций;
- климатические условия эксплуатации здания.

2. Значение расчетной УТЗХ эксплуатируемых зданий, как правило, превышает нормируемые величины, предписанные Сводом правил в 1,5–2 раза.

3. Замена оконных проемов стеклопакетами, позволяет уменьшить значение УТЗХ здания (в зависимости конкретных условий эксплуатации) в среднем на 5–15 %.

4. Использование ограждающих конструкций, удовлетворяющих требованиям действующего в настоящее время свода правил, приводит к сокращению значения УТЗХ в среднем в 2–2,5 раза, однако требует значительных затрат на доработку теплозащитной оболочки в период реконструкции здания. При этом нормируемые величины удельной теплозащитной характеристики здания превышают расчетные значения на 10–50 %.

5. При установке стеклопакетов с максимальным значением термического сопротивления теплопередаче, равным 1,90 (м²·°C)/Вт, величина отклонения УТЗХ для рассмотренных зданий будет минимальной. Тогда появляется возможность удовлетворить требованию свода правил [1], относящихся к удельной характеристике расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Выполнение этого условия допускает, согласно п. 5.2 [1], нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче: для наружных

стен на 37 % , для остальных ограждающих конструкций на 20 % ниже нормативных величин.

Совершенствование технических решений систем отопления, вентиляции и кондиционирования

Помимо архитектурно-строительных решений, важнейшей инженерной задачей является оптимизация систем обеспечения микроклимата зданий и сооружений – систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК).

В целях повышения энергетической эффективности и сокращения потребления ресурсов системами ОВК применяются различные энергосберегающие мероприятия:

- уменьшение инфильтрации;
- повышение эффективности воздухораспределения;
- местное кондиционирование;
- децентрализация систем СКВ;
- зонирование принципиального решения систем обеспечения микроклимата по сторонам света;
- использование предварительного нагрева и охлаждения;
- рекуперация тепла и холода;
- применение баков-аккумуляторов холода;
- совершенствование средств автоматизации технических систем и другие.

Методы оптимизации систем обеспечения микроклимата ОВК рассмотрены в работах профессоров А.А. Рымкевича [2] и А.Г. Сотникова [3]. Применительно к проблеме совершенствования систем ОВК они используют системный анализ.

Для проведения работ по оптимизации систем жизнеобеспечения необходимо определить их критерии качества, которые могут быть:

- функциональными – обеспеченность нормируемых параметров, функционально-технологическая надежность;
- технологическими: расход теплоты, холода, воды, пара, наружного, приточного, вытяжного и рециркуляционного воздуха;
- конструктивно-компоновочными: занимаемая площадь и объем, габариты, удобство монтажа и ремонта, эстетические характеристики;
- эксплуатационно-энергетическими: расход электроэнергии, тепловой энергии, ремонтных материалов, удобство обслуживания, надежность;
- экономическими: капитальные и приведенные затраты, переменные составляющие эксплуатационных затрат.

Для проведения мероприятий по оптимизации систем жизнеобеспечения необходимо иметь полную и обширную базу данных оборудования систем ОВК. Созданная в настоящий момент база данных дополняется, фрагмент ее представлен на рис. 2.

№	Наименование	С	D	E	F	G	H I J		
							Габаритные размеры, мм		
		Холодопроизводительность, кВт	Теплопроизводительность, кВт	Потребл. мощность, охлаждение, кВт	Потребл. мощность, обогрев, кВт	Класс энергоэффективности	A	B	A
1	Carrier 42QHM009ES	2,6	3,9	0,58	0,95	A / A	315	990	218
2	Carrier 42QHM012ES	3,5	3,9	0,9	0,95	A / A	315	990	218
3	Carrier 42QHM018ES	5,2	5,6	1,37	1,6	A / A	343	1186	258
4	Carrier 42QHM024ES	7	7,6	1,89	1,89	A / B	343	1186	258
5	Carrier 42QHC009DS	2,7	2,9	0,82	0,78	A / A	291	730	192
6	Carrier 42QHC012DS	3,5	3,8	1,25	1,12	A / A	300	812	192
7	Carrier 42QHC018DS	5,2	5,5	1,63	1,72	A / A	319	973	218
8	Carrier 42QHC024DS	6,4	7	2,06	2,12	A / A	338	1082	225
9	Carrier 42UQV025M	2,5	3,2	0,77	0,89	A / A	250	740	210
10	Carrier 42UQV035M	3,5	4,2	1,09	1,15	A / A	275	790	235
11	Carrier 42UQV050M	5	5,8	1,51	1,6	A / A	320	1050	238
12	Carrier 42UQV060M	6	7	1,99	2,18	B / C	320	1050	238

Рис. 2. Фрагмент базы данных оборудования систем ОВК

Экспериментальный стенд для оценки энергетической эффективности систем жизнеобеспечения

В настоящий момент подготавливается и дорабатывается экспериментальный лабораторный стенд для оценки энергетической эффективности систем жизнеобеспечения, в котором используются системы жизнеобеспечения и комплекс контрольно-измерительных приборов. Они позволяют разработать методику и алгоритмы повышения энергетической эффективности и сокращения потребления ресурсов системами жизнеобеспечения, а также разработать методические указания для лабораторного практикума для бакалавров и магистров.

Экспериментальный стенд состоит из ряда систем ОВК:

- приточного и вытяжного вентиляторов центрального кондиционера с расходом воздуха 4512 м³/ч у каждого;
- воздухоохладителя центрального кондиционера с мощностью охлаждения 11,2 кВт;
- воздухонагревателя центрального кондиционера с мощностью нагрева 22,5 кВт;
- компрессорно-конденсаторного блока настенного кондиционера с мощностью нагрева 5 кВт и мощностью охлаждения 4,5 кВт;
- внутреннего блока настенного кондиционера с расходом воздуха 720 м³/ч;
- тепловой завесы с расходом воздуха 1164 м³/ч;
- радиаторов отопления с мощностью нагрева 3,2 кВт.

Помимо указанных систем жизнеобеспечения, экспериментальный стенд включает в себя комплекс контрольно-измерительных приборов:

- теплосчетчики систем отопления;
- анемометры для определения подвижности воздуха;
- термометры для определения температуры наружного и внутреннего воздуха;
- пирометр для определения температуры поверхностей;
- тепловизионную камеру для наблюдения изменения температуры рассматриваемой поверхности.

Заключение

В результате проведенного исследования была достигнута цель и решены поставленные задачи. Основными результатами исследования являются:

- анализ действующих нормативных документов с целью выявления существующих методик определения расхода тепловой энергии зданий, затрачиваемой на ОВК;
- определение критериев качества оптимизации систем жизнеобеспечения;
- создание базы данных оборудования систем ОВК;
- подготовка экспериментального стенда для проведения экспериментального исследования.

Из выполненных расчетов и анализа следует:

- значение расчетной удельной теплозащитной характеристики эксплуатируемых зданий, как правило, превышает нормируемые величины в 1,5–2 раза;
- замена оконных проемов стеклопакетами, позволяет уменьшить значение УТЗХ здания в среднем на 5–15 %.
- использование современных теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций, приводит к сокращению значения УТЗХ в среднем в 2–2,5 раза, однако требует значительных затрат на доработку теплозащитной оболочки в период реконструкции здания. При этом нормируемые величины удельной теплозащитной характеристики здания превышают расчетные значения на 10–50 %.

Публикации

1. Лысев В.И., Шилин А.С. Анализ требований свода Правил теплозащитной оболочке здания // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2017. № 1 (25). С. 15–22.
2. Лысев В.И., Чурюмов М.С., Шилин А.С. Энергетические показатели зданий учебных корпусов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015. № 1 (17). С. 33–37.
3. Лысев В.И., Чурюмов М.С., Шилин А.С. Оценка потенциала теплоснабжения для зданий общежитий // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»: материалы конференции. Ч. 1. СПб., 2015. С. 394–397.
4. Лысев В.И., Шилин А.С. Результаты энергетического обследования здания общежития // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»: материалы конференции. Ч. 1. СПб., 2015. С. 398–401.

Литература

1. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2009. М., 2012. – 96 с.
2. Рымкевич А.А. Системный анализ оптимизации общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. СПб., 2003. – 271 с.
3. Сотников А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха: полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СГВС и СХС: в 2 т. Т. 1. СПб., 2013. – 423 с.



Щеглов Константин Андреевич
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра вычислительной техники
E-mail: scheglov.konstantin@gmail.com

ПОДХОД К УПРОЩЕНИЮ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УГРОЗ АТАК НА ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ

К.А. Щеглов

Научный руководитель – профессор А.А. Ожиганов

Цель проекта – разработка и обоснование подхода к упрощению задачи моделирования угроз атак на информационную систему с помощью марковских моделей с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Моделирование атак на информационную систему, при котором на практике используются марковские цепи [1, 2] либо математический аппарат теории массового обслуживания [3], требует экспертного задания ключевых характеристик безопасности (интенсивности реализации и вероятности отражения атак), что существенно ограничивает применение этих методов.

В работе [4] рассматривается метод моделирования угрозы атаки марковской моделью с дискретными состояниями и непрерывным временем, корректность применения которого изложена в [5]. Он основан на введенной в [6] интерпретации угрозы атаки схемой

параллельного резервирования создающих ее угроз уязвимостей. В результате моделирования могут быть рассчитаны надежностные (искомые) параметры и характеристики безопасности угрозы атаки, поскольку при этом моделируется не атака как процесс последовательного воздействия нарушителем на информационную систему, а именно ее угроза как процесс возникновения и устранения в системе отказов информационной безопасности – реальных угроз атак.

Подход к моделированию, состоящий в построении из исходной марковской модели модели вероятностного разряжения входных потоков случайных событий с последующим расчетом на ней требуемых надежностных параметров и характеристик безопасности, изложен и обоснован в [6]. Здесь также сформулированы требования к корректности марковских моделей угроз атак, при выполнении которых реализуется корректное вероятностное разряжение входных потоков случайных событий.

При всей универсальности и практической значимости (при моделировании не требуется использования каких-либо экспертных оценок) предложенного подхода к моделированию он обладает одним существенным недостатком, присущим марковским моделям, – сложностью решения задачи моделирования, вызванной необходимостью в общем случае составления и решения линейных алгебраических уравнений большой размерности. Это обуславливает актуальность задачи по упрощению моделирования угроз атак.

Решение задачи

Применительно к моделям, используемым для моделирования угроз атак (угроз безопасности), примеры которых приведены в [4], можно выделить две принципиальные особенности.

1. События поступления в систему заявок на обслуживание как одного, так и различных типов независимы.

2. События обслуживания заявок различных типов также независимы. Это вызвано тем, что каждый из приборов обслуживает заявки только одного типа и этот процесс полностью независим от событий возникновения в системе заявок на обслуживание иных типов.

Исходя из того, что условная вероятность независимого события равна его безусловной вероятности, сделаем в отношении моделирования угроз безопасности, создаваемых несколькими угрозами уязвимостей различных типов, события обслуживания которых независимы, предположение, которое сформулируем в виде утверждения, требующего доказательства.

Утверждение. В предположении о том, что события возникновения и устранения в системе заявок на обслуживание различных типов независимы, значение стационарной вероятности состояния может определяться как вероятность возникновения соответствующих независимых событий на множестве возможных несовместных событий моделируемой системы. При этом вероятность данного события – присутствия в системе одновременно нескольких заявок на обслуживание различных типов – имеет физический смысл доли времени пребывания системы в этом состоянии.

Таким образом, требуется доказать следующее.

Если в систему поступает R входных потоков случайных событий различных типов с номерами $r = 1, \dots, R$, то стационарная вероятность состояния пребывания в системе одновременно нескольких заявок различных типов, например $r = 1$ и $r = 2$ (обозначим $P_{1,2}$), может быть определена следующим образом:

$$P_{1,2} = P_1 P_2 \prod_{r=3}^R (1 - P_r),$$

при этом $P_{1,2}$ интерпретируется как доля времени пребывания системы в этом состоянии,

Доказательство. Рассмотрим частный случай – конечную модель, приведенную на рис. 1а. Данное доказательство необходимо для обоснования общности предлагаемого подхода, поскольку подобные модели широко используются в теории надежности. При этом учитывается следующая особенность объекта моделирования – не может отказать уже отказавший (находящийся на восстановлении) элемент. Несоблюдение этого условия приводит к некорректности использования в модели стационарного входного потока случайных событий.

Преобразуем модель, приведенную на рис. 1а в модель, представленную на рис. 1б. Здесь λ_i – интенсивность возникновения заявок на обслуживание событий i -типа, а μ_i – интенсивность их обслуживания.

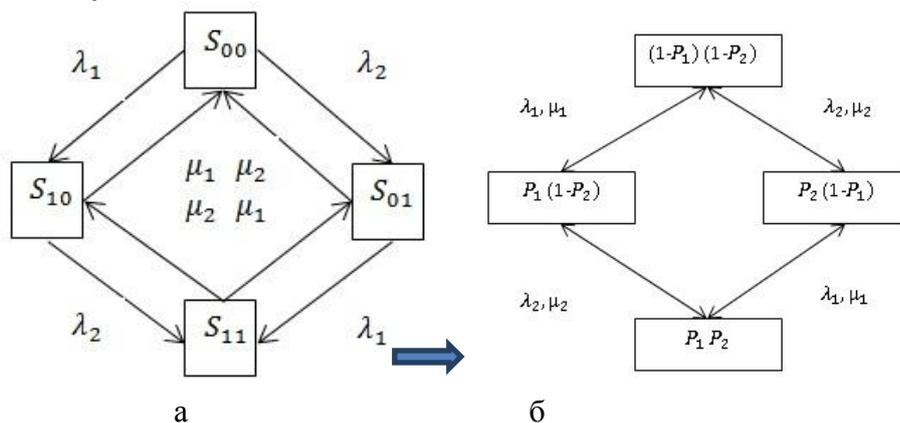


Рис. 1. Иллюстрация преобразования модели: а – исходная модель; б – преобразованная

Преобразование состоит во взвешивании состояний системы вероятностями присутствия в ней соответствующих заявок на обслуживание, которые обозначим как P_1 и P_2 .

Пусть состоянием S_{00} характеризуется отсутствие заявок на обслуживание, а вероятность пребывания системы в этом состоянии $P_{00} = (1-P_1)(1-P_2)$; состоянием S_{10} характеризуется присутствие в системе заявки на обслуживание только первого типа, а вероятность пребывания системы в этом состоянии $P_{10} = P_1(1-P_2)$; аналогично для заявки на обслуживание второго типа: состояние S_{01} и вероятность $P_{01} = P_2(1-P_1)$; состоянием S_{11} характеризуется присутствие в системе заявок на обслуживание обоих типов, а вероятность пребывания системы в этом состоянии $P_{11} = P_1P_2$.

Состояния системы преобразованной модели образуют полную группу несовместных событий, так как их суммарная вероятность: $P_{00} + P_{10} + P_{01} + P_{11} = 1$.

Для определения требуемых вероятностей будем рассматривать две модели: модель возникновения и обслуживания заявок только одного типа (рис. 2а) и модель возникновения и обслуживания в одной системе заявок обоих типов (рис. 2б).

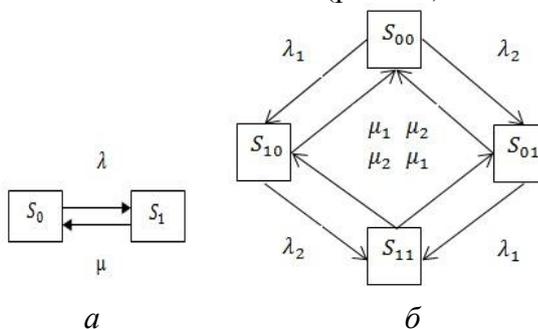


Рис. 2. Исследуемые модели

Используя некорректную конечную модель, приведенную на рис. 2а, определим по отдельности стационарные вероятности состояния присутствия в системе уязвимостей обоих типов:

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1},$$

$$P_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}.$$

Далее получим для модели, приведенной на рис. 2б, искомые значения стационарных вероятностей, при этом будем учитывать то, как взвешены в модели состояния системы (рис. 3б):

$$P_{00} = (1 - P_1)(1 - P_2) = \frac{\mu_1\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)},$$

$$P_{10} = P_1(1 - P_2) = \frac{\lambda_1\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)},$$

$$P_{01} = P_2(1 - P_1) = \frac{\lambda_2\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)},$$

$$P_{11} = P_1P_2 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}.$$

Полностью аналогичный результат моделирования получим, построив и решив соответствующую систему линейных уравнений для модели, приведенной на рис. 1а:

$$\begin{cases} \mu_1 P_{10} + \mu_2 P_{01} = (\lambda_1 + \lambda_2) P_{00} \\ \lambda_1 P_{00} + \mu_2 P_{11} = (\lambda_2 + \mu_1) P_{10} \\ \lambda_2 P_{00} + \mu_1 P_{11} = (\lambda_1 + \mu_2) P_{01} \\ \lambda_2 P_{10} + \lambda_1 P_{01} = (\mu_1 + \mu_2) P_{11} \end{cases},$$

что в рамках данного примера подтверждает корректность доказываемого утверждения.

Использование этого утверждения для рассматриваемых моделей позволяет получать требуемые параметры и характеристики угроз отказов безопасности без составления и решения сложных систем линейных алгебраических уравнений для системы в целом. Моделировать при этом требуется лишь отдельные угрозы уязвимостей, что принципиально упрощает задачу.

Корректность данного подхода к моделированию угроз безопасности (для моделей с объединенными состояниями) доказывается аналогично с той лишь разницей, что для корректных конечных моделей имеем:

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1},$$

$$P_2 = \lambda_2 / \mu_2.$$

Замечание. Модель, приведенная на рис. 1а, в данном случае преобразуется в модель, представленную на рис. 3.

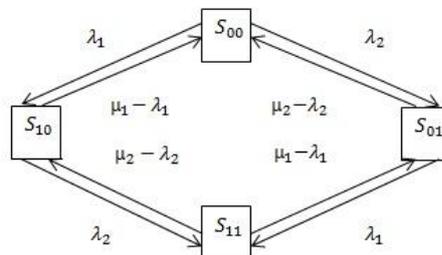


Рис. 3. Модель с объединенными состояниями

С учетом полученных результатов для искомой характеристики P_{11} сразу, без составления и решения соответствующих уравнений, можно записать:

$$P_{11} = P_1P_2 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\mu_1\mu_2}.$$

Определим параметры отказов угрозы безопасности. Для интенсивности возникновения в системе отказов безопасности (по крайней мере, одной реальной угрозы атаки) λ_a можно записать [7]:

$$\lambda_a = P_1(1 - P_2)\lambda_2 + P_2(1 - P_1)\lambda_1.$$

Подставляем в данное выражение рассчитанные значения P_1 и P_2 и находим значение λ_a . Интенсивность же устранения в системе отказов безопасности (всех одновременно присутствующих реальных угроз атак) μ_a определяется следующим образом:

$$\mu_a = \frac{P_1(1 - P_2)\lambda_2 + P_2(1 - P_1)\lambda_1}{P_1P_2}.$$

Характеристики угрозы отказов безопасности

Вероятность готовности системы к безопасной эксплуатации P_{0a} имеет вид:

$$P_{0a} = 1 - P_1P_2.$$

Среднее время восстановления безопасности $T_{вва}$ и среднее время наработки на отказ безопасности $T_{оуа}$ информационной системы в отношении угрозы атаки представим в виде:

$$T_{вва} = \frac{1}{\mu_a}, T_{оуа} = \frac{1}{\lambda_a} - T_{вва}.$$

Среднее время между отказами безопасности определим как $T_{оуа} + T_{вва}$.

Как видим, без составления и решения системы алгебраических уравнений достаточно просто могут быть определены параметры и характеристики угрозы безопасности с целью количественной оценки ее актуальности.

Определим, какие в общем случае для решения рассматриваемой задачи моделирования должны использоваться финальные расчетные формулы.

Пусть в системе возможно возникновение R типов уязвимостей, то есть $r=1, \dots, R$. Для любого r -го типа уязвимостей с использованием соответствующей статистики могут быть определены параметры: интенсивность возникновения уязвимостей r -го типа λ_r и интенсивность устранения уязвимостей r -го типа μ_r . Вероятность отказа безопасности в отношении угрозы уязвимостей (в системе присутствует по крайней мере одна реальная угроза уязвимостей) P_{yr} :

$$P_{yr} = \lambda_r / \mu_r.$$

С учетом всего сказанного ранее стационарная вероятность отказа безопасности в отношении угроз атак (в системе присутствует по крайней мере одна реальная угроза атаки) P_a может быть определена следующим образом:

$$P_a = \prod_{r=1}^R P_{yr}.$$

Вероятность готовности системы к безопасной эксплуатации P_{0a} :

$$P_{0a} = 1 - \prod_{r=1}^R P_{yr}.$$

Принципиально важным здесь является то, что данные формулы были получены через построение соответствующей марковских моделей. Во-первых, это позволяет интерпретировать вероятности P_a и P_{0a} как доли времени нахождения системы в соответствующих состояниях, во-вторых это позволяет определить требуемые надежность параметры и временные характеристики угрозы атаки.

Интенсивность возникновения в системе отказа безопасности реальна по крайней мере одна угроза атаки, λ_a , может быть определена следующим образом:

$$\lambda_a = (1 - P_{yR})\lambda_R \prod_{r=1}^{R-1} P_{yr} + \dots + (1 - P_{y1})\lambda_1 \prod_{r=2}^R P_{yr}.$$

Интенсивность устранения в системе отказа безопасности – всех присутствующих в системе реальных угроз атак, μ_a :

$$\mu_a = \lambda_a / \prod_{r=1}^R P_{yr}.$$

Среднее время наработки на отказ безопасности информационной системы (восстанавливаемая система) в отношении угрозы атаки (T_{0ya}) и среднее время восстановления безопасности информационной системы ($T_{вya}$) в отношении угрозы атаки определяются следующим образом:

$$T_{вya} = \frac{1}{\mu_a}, \quad T_{0ya} = \frac{1}{\lambda_a} - T_{вya}.$$

Среднее время между отказами безопасности: $T_{0ya} + T_{вya}$.

Замечание. Предлагаемый подход к упрощению задачи моделирования может использоваться при моделировании эксплуатационных параметров и характеристик безопасности [7]. При этом должна строиться математическая модель потенциального нарушителя, учитывающая его готовность (вероятность) к реализации возникающей в системе реальной угрозы атаки, характеризуемой сложностью реализации [8].

Использование же одного и того же математического аппарата для моделирования характеристик надежности и безопасности позволяет применять излагаемый подход для моделирования безопасных отказоустойчивых информационных систем [9].

Публикации

1. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Интерпретация и моделирование угрозы атаки на информационную систему. Часть 2. Моделирование угрозы атаки // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 1. С. 54–64.
2. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Интерпретация и моделирование угрозы атаки на информационную систему. Часть 1. Моделирование угрозы уязвимости и интерпретация угрозы атаки // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 12. С. 930–940.
3. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Математические модели эксплуатационной информационной безопасности // Вопросы защиты информации. 2014. № 3. С. 52–65.
4. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Моделирование угроз атак на защищенную информационную систему // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 12. С. 980–990.
5. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Эксплуатационная безопасность. Моделирование реализации угроз атак потенциальным нарушителем // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 1. С. 34–41.
6. Щеглов А.Ю., Щеглов К.А. Сложность реализации угрозы безопасности и математическая модель потенциального нарушителя // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 2. С. 142–150.
7. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Подход к моделированию параметров и характеристик интегрированной информационно-эксплуатационной безопасности // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 4. С. 282–290.

Литература

1. Росенко А.П. Внутренние угрозы безопасности конфиденциальной информации: Методология и теоретическое исследование. М., 2010. – 160 с.
2. Иванов К.В., Тутубалин П.И. Марковские модели защиты автоматизированных систем специального назначения. Казань, 2012. – 216 с.
3. Карпов В.В. Вероятностная модель оценки защищенности средств вычислительной техники с аппаратно-программным комплексом защиты информации от несанкционированного доступа // Программные продукты и системы. 2003. № 1. С. 31–36.

4. *Щеглов К.А., Щеглов А.Ю.* Интерпретация и моделирование угрозы атаки на информационную систему. Часть 2. Моделирование угрозы атаки // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 1. С. 54–64.
 5. *Щеглов К.А., Щеглов А.Ю.* Интерпретация и моделирование угрозы атаки на информационную систему. Часть 1. Моделирование угрозы уязвимости и интерпретация угрозы атаки // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 12. С. 930–940.
 6. *Щеглов К.А., Щеглов А.Ю.* Моделирование угроз атак на защищенную информационную систему // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 12. С. 980–990.
 7. *Щеглов К.А., Щеглов А.Ю.* Эксплуатационная безопасность. Моделирование реализации угроз атак потенциальным нарушителем // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 1. С. 34–41.
 8. *Щеглов А.Ю., Щеглов К.А.* Сложность реализации угрозы безопасности и математическая модель потенциального нарушителя // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 2. С. 142–150.
 9. *Щеглов К.А., Щеглов А.Ю.* Подход к моделированию параметров и характеристик интегрированной информационно-эксплуатационной безопасности // Информационные технологии. 2017. Т. 23. № 4. С. 282–290.
- .

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка математической модели составления рецептур кормов для непродуктивных животных на основе теории нечетких логических множеств <i>О.И. Аксенова</i>	4
Разработка технологии пшеничного кваса <i>М.С. Алексева</i>	8
Идентификация присоединенных моментов инерции моделей судов адаптивными и робастными алгоритмами на основе программных движений <i>А.С. Алышев</i>	10
Разработка метода поиска дефектов типа «неспай» и «частичный непропай» в паяных соединениях <i>Н.В. Астрединова</i>	15
Разработка метода динамического переключения операторов мутации, используемых в искусственных иммунных системах и при локальном поиске <i>Н.С. Буланова</i>	22
Онтологическая система хранения результатов исследований по медицинской диагностике <i>А.С. Ватьян</i>	27
Многоуровневое мультиагентное моделирование телефонных звонков для исследования распространения информации в мобильных сетях <i>А.А. Вишератин</i>	32
Разработка и исследование внутреннего оребрения примыкающих полостей поршневых компрессоров <i>П.О. Галяев</i>	35
Разработка оптико-цифрового комплекса дистанционной инженерной разведки и картографирования минных полей на базе БПЛА для задач гуманитарного разминирования <i>А.Д. Головин</i>	41
Разработка и создание чувствительного элемента распределенного волоконно-оптического датчика на основе массивов решеток Брэгга для мониторинга температуры и деформаций конструктивных элементов <i>А.И. Грибаев</i>	47
Разработка энергоэффективного смарт-ортеза нижней конечности <i>М.А. Ерофеев</i>	51
Разработка, создание и исследование волоконно-оптического интерферометрического датчика неразрушающего контроля <i>М.Е. Ефимов</i>	55
Сканирующая зондовая микроскопия на основе зонда-нанокапилляра <i>М.В. Жуков</i>	59
Разработка методов финитного управления нелинейными системами в условиях наличия возмущающих воздействий и запаздывания <i>К.А. Зименко</i>	63
Разработка системы компенсации дрейфа потенциала нулевой точки в многоуровневом инверторе с фиксированной нейтралью в замкнутых системах электропривода <i>П.Д. Золов</i>	66

Рекомендательные системы с контентной фильтрацией <i>К.В. Ильина</i>	72
Разработка методов создания кремниевых наноструктур для приложений в нанофотонике <i>А.Н. Камалиева</i>	76
Разработка и создание чувствительного элемента волоконно-оптического датчика температуры повышенной точности на основе решеток Брэгга с фазовым сдвигом <i>К.А. Коннов</i>	81
Формирование системы эффективного функционирования промышленного предприятия на основе технологического бенчмаркинга <i>Т.С. Кочегарова</i>	86
Новые технологические решения и методы расчета кинетики теплообменных процессов производства <i>convenience food</i> с использованием белковых ингредиентов побочных продуктов мясопереработки <i>А.А. Краснова</i>	90
Разработка состава и технологии ферментированного шербета для здорового питания <i>Е.В. Курганова</i>	92
Математическое моделирование процесса формирования наночастиц в объемной полости <i>Д.А. Кучер</i>	98
Методы детектирования атак повторного воспроизведения на голосовые биометрические системы <i>Г.М. Лаврентьева</i>	104
Система регистрации растягивающей нагрузки в буксируемой сейсмической косе <i>В.С. Лавров</i>	110
Разработка семейства методов априорной оценки рисков, связанных с проведением массовых мероприятий <i>А.А. Ланцева</i>	114
Функциональное представление объектно-ориентированных определений моделей динамических систем <i>И.П. Логинов</i>	119
Исследование и разработка состава замороженного десерта для диабетического питания с использованием кунжутной муки <i>М.В. Лугова</i>	124
Разработка системы управления мобильным роботом на пересеченной местности <i>В.В. Мазулина</i>	126
Теоретическое и экспериментальное исследование гидродинамики трехфазных потоков (воздух-вода-измельченное зерно) применительно к технологиям производства биоэтанола <i>Ю.Л. Малахов</i>	131
Исследование структуры и теплопроводности композиционных материалов с микро- и наноразмерными добавками <i>А.А. Марова</i>	136
Спектральная задача для изогнутой цепочки резонаторов, помещенной во внешнее магнитное поле <i>А.С. Мелихова</i>	143
Адаптивное воспроизведение неизвестных мультисинусоидальных сигналов в многоканальных системах с запаздываниями по входам <i>А.С. Милушин</i>	148
Разработка метода измерения износа деталей в режиме реального времени <i>К.А. Нуждин</i>	154

Адаптивная настройка параметров эволюционных алгоритмов с помощью обучения с подкреплением <i>И.А. Петрова</i>	160
Методика отладки встроенных систем с детерминированным воспроизведением вычислительного процесса на основе модели поведения <i>В.Ю. Пинкевич</i>	167
Исследование влияния неорганических и углеродных наполнителей на механические свойства пенополиуретановых композитов <i>Д.В. Пихуров</i>	172
Разработка устройства регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков <i>Д.А. Погорелая</i>	176
Разработка системы поддержки принятия решений для обеспечения инженерно-технической безопасности объектов <i>Л.А. Полякова</i>	182
Сенсорные приложения гибридных структур на основе полупроводниковых нанопластин и наноструктурированного углерода <i>И.А. Резник</i>	185
Методология построения интегрированной модели поддержки принятия клинических решений при назначении медикаментозной терапии <i>А.А. Семакова</i>	190
Разработка робастных алгоритмов управления микроперемещениями объекта, установленного на нежестком основании <i>А.И. Смирнов</i>	196
Исследование абляции катарактального хрусталика излучением <i>Yb,Er:Glass</i> -лазера <i>С.Н. Смирнов</i>	202
Построение и анализ свойств модели дискретного графа с цепочкой из колец Холштейна – Хаббарда со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы <i>М.О. Смолкина</i>	208
Исследование механизма разрушения кевларовых нитей <i>Г.А. Соловьева</i>	215
Разработка технологии акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования соединения сваркой трением с перемешиванием <i>К.А. Степанова</i>	220
Определение функциональной активности нового вида мягкого сыра с пророщенными семенами овса <i>О.С. Ходунова</i>	226
Инновационная технология мягкого сыра пониженной аллергенности <i>А.Ю. Чечеткина</i>	229
Прецизионный алгоритм цифрового управления двигателями воздушных винтов летательных аппаратов <i>Ю.В. Чугина</i>	232
Методы формирования энергоэффективных систем отопления, вентиляции и кондиционирования общественных зданий Санкт-Петербурга <i>А.С. Шилин</i>	239
Подход к упрощению задачи моделирования угроз атак на информационную систему <i>К.А. Щеглов</i>	244

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под редакцией проф. В.О. Никифорова. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 254 с.

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

Под редакцией проф. В.О. Никифорова
Дизайн обложки А.В. Чуркова
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано в печать 01.06.2018
Заказ № 4133
Тираж 100 экз.