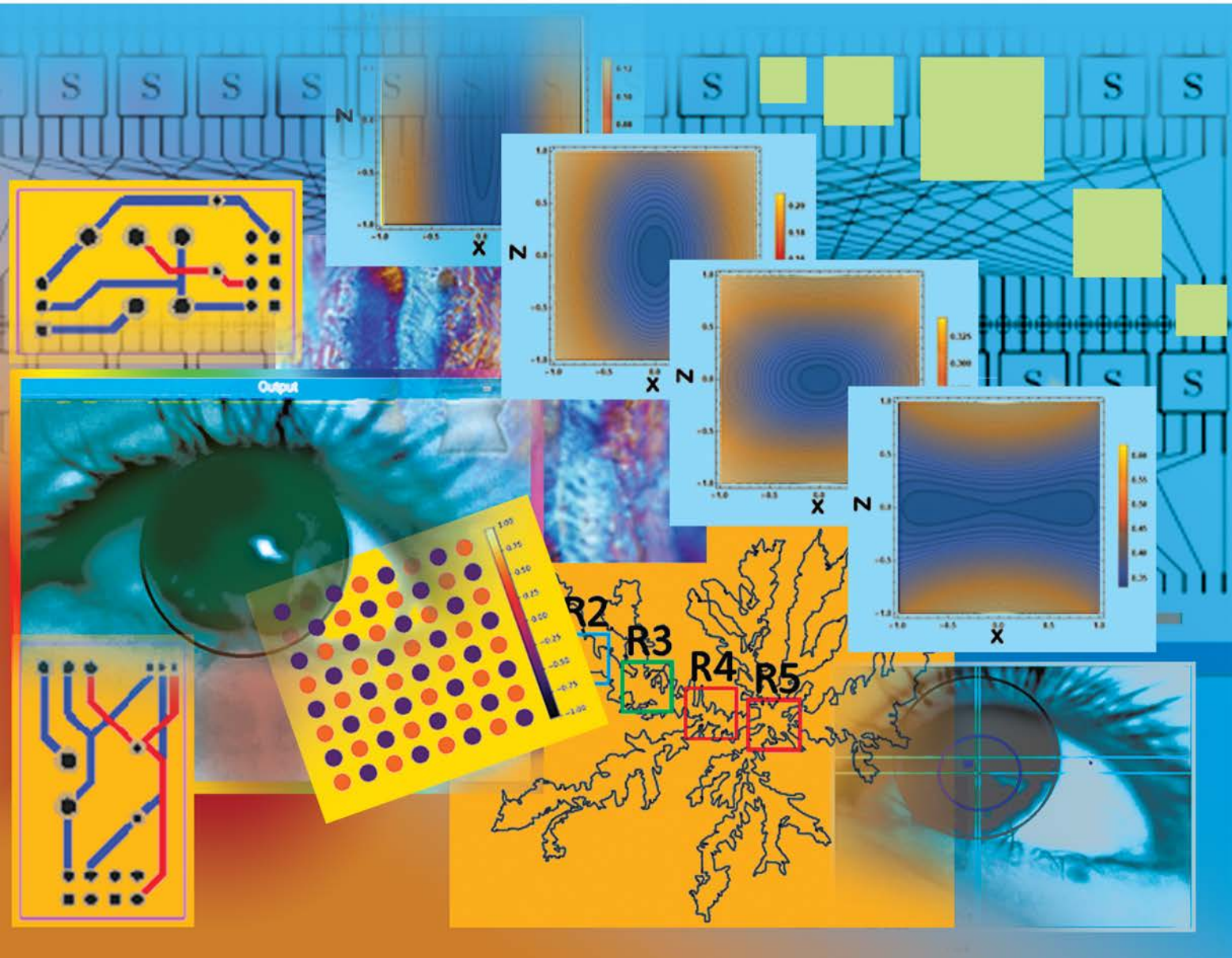
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

АННОТИРОВАННЫЙ СБОРНИК

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ

БАКАЛАВРОВ

2020



МИНИСТЕРСТВО НАУКИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО

Сборник трудов

Санкт-Петербург
2020

Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО / под ред. д.т.н., профессора В.О. Никифорова. Сборник трудов. СПб.: Университет ИТМО. 2020. 370 с.

В сборнике представлены лучшие научно-исследовательские выпускные квалификационные работы бакалавров Университета ИТМО.

Материалы публикуются с целью развития творческого потенциала дипломированных специалистов, их навыков научно-исследовательской работы, стимулирования участия студентов в научных исследованиях, усиления роли научно-исследовательской работы в повышении качества подготовки специалистов с высшим образованием, формирования резерва кадров высшей квалификации.

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

©Университет ИТМО,2020
© Авторы, 2020

ВВЕДЕНИЕ

«Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО» опубликован по результатам конкурса на лучшую научно-исследовательскую выпускную квалификационную работу (НИВКР) среди бакалавров Университета ИТМО.

Конкурсная комиссия оценивала умение студента проводить самостоятельную творческую исследовательскую работу, профессиональную зрелость выпускника и его способность решать реальные научно-технические задачи. Конкурс проводился в целях совершенствования системы подготовки кадров высшей квалификации, в рамках реализации программы развития вуза, как Национального исследовательского университета на 2009–2020 годы.

Первый этап Конкурса проводился на выпускающих факультетах/институтах/кластерах университета. Государственная экзаменационная комиссия (ГЭК) определяла лучшие работы по каждому из направлений подготовки в ходе защиты ВКР. Руководители факультетов/институтов/кластеров определяли лауреатов I, II, III степени. По итогам первого этапа лауреатами I степени стали 11 бакалавров, лауреатами II степени - 11 бакалавров, лауреатами III степени - 9 бакалавров.

Второй этап Конкурса проводился на мегафакультетах университета, где Директора мегафакультетов определили одну лучшую НИВКР бакалавров своего мегафакультета из числа работ лауреатов I степени предыдущего этапа. Лауреаты I степени факультетов/институтов/кластеров, не относящихся к мегафакультетам, продолжили участие в Конкурсе на заседании НТС (заключительном этапе). Таким образом, на мегафакультетах состоялось 4 Конкурса на «Лучшую НИВКР».

Третий завершающий этап Конкурса проводился на уровне университета, где Научно-технический совет (НТС) на основании материалов и статистических данных НИВКР лауреатов I степени предыдущего этапа отобрал лучшие работы, авторы которых стали победителями Конкурса.

Статистические данные участия бакалавров в Конкурсе

Этап	Название конкурса	Приняло участие	Победители различных степеней
I	Конкурс факультетов/ институтов/кластеров	91	31
II	Конкурс мегафакультетов	10	4
III	Конкурс университета	5	5

По итогам Конкурса среди бакалавров были определены 5 победителей на «Лучшую НИВКР университета».

Общее количество бакалавров, участвовавших в конкурсе на «Лучшую научно-исследовательскую выпускную квалификационную работу», составило 91 человек.

Организационную работу по Конкурсам проводили следующие структурные подразделения Университета ИТМО: Департамент научных исследований и разработок, Центр студенческой науки, конференций и выставок.

Основные критерии оценки работ

При оценке НИВКР учитывались следующие критерии:

- актуальность научного исследования;
- степень самостоятельности и качество выполненной работы;
- оригинальность предложенных решений;
- качество оформления (в том числе соблюдение ГОСТов);
- логичность изложения, стиль изложения;
- стадия доведения проекта (частичная реализация; законченный проект; программный продукт, который может быть «внедрен» и т.п.);
- выполнение НИР в качестве соисполнителя;
- наличие выигранных грантов, стипендий Президента и Правительства Российской Федерации;
- выступления с докладами по данной тематике на научных конференциях, семинарах, конкурсах, выставках и олимпиадах всех уровней (международных, всероссийских, региональных);
- наличие наград, полученных на всероссийских, региональных и городских конкурсах, патентов, заявок на объекты интеллектуальной собственности;
- основные результаты должны быть опубликованы в научных журналах и изданиях (как в российских, так и зарубежных).

Общие требования к материалам, представляемым на НТС

Для окончательного подведения итогов Конкурса на НТС представлялись следующие документы:

- анкета участника Конкурса;
- краткое изложение ВКР в форме статьи от 4 до 6 страниц.

Итоги Конкурса были подведены на заседании НТС университета и оформлены приказом ректора Университета ИТМО №1654-уч от 05.08.2020 года/

ПОБЕДИТЕЛИ КОНКУРСА
НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»

Звягинцева Дарья Александровна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет информационных технологий и программирования,
студент группы М3437,
направление подготовки: 01.03.02 – Прикладная математика и информатика,
e-mail: daryazvyaginceva@yandex.ru
Ульянцев Владимир Игоревич
Год рождения: 1990
Университет ИТМО,
факультет информационных технологий и программирования,
к.т.н., доцент,
e-mail: vl.ulyantsev@gmail.com

УДК 004.855.5

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ОТКРЫТОЙ КВАНТОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д.А. Звягинцева
Научный руководитель – к.т.н., доцент В.И. Ульянцев

Работа выполнена в рамках темы НИР №718574 «Методы, модели и технологии искусственного интеллекта в биоинформатике, социальных медиа, киберфизических, биометрических и речевых системах».

Аннотация
Работа посвящена поиску фаз для решеток поляритонных конденсатов. Все вычисления проводятся с помощью методов машинного обучения. Для определения новых фаз использовались методы кластеризации и уменьшения размерности. В работе строится фазовая диаграмма и определяются точные межфазовые границы. Исследования проводились совместно с экспертом в области квантовой физики Александром Кириенко.

Ключевые слова
Машинное обучение, кластеризация, нейронная сеть, алгоритмы уменьшения размерности, learning by confusion, решетки поляритонных конденсатов, фаза, фазовая диаграмма.

Методы машинного обучения все глубже проникают во все сферы жизни. Нет ни одной области, которую они бы не затронули. Физика не могла остаться в стороне и уже сейчас существуют направления, в которых дальнейшее развитие невозможно без применения методов computer science. Так, в данной работе машинное обучение используется для поиска фаз в диссипативных решетках поляритонных конденсатов. Поиск фаз в классической физике достаточно трудоемкий и неуниверсальный процесс, который часто связывают с термодинамическими уравнениями. Однако рассматриваемая система является неравновесной и к ней не может быть применен данный подход.

Рассматриваемый объект – микрорезонатор с квантовой ямой. Он состоит из нескольких слоев. Внешние – два брэгговских зеркала. Внутренние – возбужденные полупроводники, с разным коэффициентом преломления. С помощью лазера можно

возбудить внутри огромное количество электронов. В возбужденном состоянии они покидают свое первоначальное место. Место, которое покинул электрон называется дырка. Электроны перемещаются не одни, а вместе со своими дырками. Такая пара электрон плюс дырка называется экситон. Если к системе не прикладывать энергию, экситон возвращается на место (соединяется с дыркой), а остаточная энергия преобразуется в фотон (свет). В микрорезонаторе фотоны отражаются от зеркал, и снова возбуждают экситоны. Такая смесь фотонов и экситонов называется поляритоном.

Описанные микрорезонаторы можно объединять в решетки. Они могут иметь разную форму (квадратичная, гексагональная). В данной работе объектом изучения являются квадратичные решетки из 64 узлов, однако все рассуждения и вычисления могут быть применены к любым конфигурациям и размерностям.

Каждый узел решетки характеризуется значением параметра намагниченности, нормированным по трем координатам (S_{xn}, S_{yn}, S_{zn}). Каждое из значений изменяется в интервале $[-1, 1]$. Для визуализации решеток в качестве цвета используется значение S_{zn}. На рис. 1 показан пример такой визуализации.

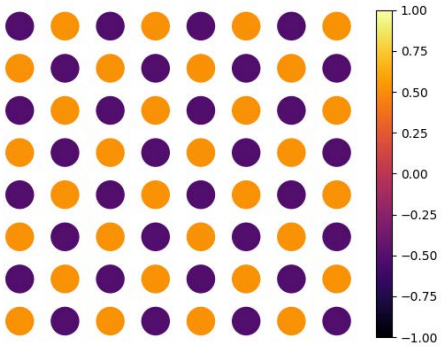


Рис. 1/ Пример визуализации решетки для антиферромагнетика.
Цвет соответствует параметру Szn

Систему характеризуют два параметра J (коэффициент связи между ячейками) и W (параметр намагниченности). Коэффициент связи между ячейками – то, как соседние узлы решетки взаимодействуют друг с другом, а параметр накачки – энергия, которая сообщается системе.

Варьируя данные параметры, можно получить различные решетки поляритонных конденсатов. При этом все узлы решеток могут принимать значение ноль (нулевая фаза), одинаковое ненулевое значение (ферромагнетик) или образовывать шахматную доску (антиферромагнетик). Вопрос состоит в том, существуют ли другие фазы помимо этих трех.

Для графического описания фазовых переходов используется фазовая диаграмма – графическое представление фазовых равновесий той или иной системы в координатах основных параметров состояния системы. В качестве параметров выступают J и W, описанные ранее.

Цель работы: найти новые фазы в диссипативных решетках поляритонных конденсатов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

– проанализировать набор данных;
– применить методы кластеризации и классификации для поиска фаз;
– составить фазовую диаграмму. Фазовая диаграмма – важная визуализация для описания фаз;

– найти точную границу между фазами методами машинного обучения.

Прежде всего необходимо было провести анализ исходных данных. Так, были построены графические изображения для решеток при различных параметрах и выявлены интересные решетки, которые могут являться фазами.

Первым способом подтверждения гипотезы разбиения стал метод tSNE. Метод tSNE (англ. t-distributed Stochastic Neighbor Embedding) – стохастическое вложение соседей с t-распределением. Это алгоритм машинного обучения применяется для визуализации и является техникой снижения размерности и делает это таким образом, что похожие объекты в новом пространстве расположены близко, а разные – далеко [1]. «Похожесть» объектов хорошо ложится на определение фаз. Таким образом, если tSNE поместит объекты, которые мы считаем одной фазой, рядом и далеко от других решеток, это укрепит идею о том, что объекты относятся к одной фазе.

Часто бывает удобно уменьшить размерность исходных данных перед обучением. В работе для этого используется метод PCA. Метод главных компонент (англ. principal component analysis, PCA) – метод уменьшения размерности, с наименьшей потерей информации. При декомпозиции набора данных PCA преобразует их в набор последовательных ортогональных компонентов, при этом максимизируя величину выборочной дисперсии [2].

Меняя параметры для алгоритма tSNE, такие как perplexity (количество ближайших соседий соседей в алгоритме обучения) и learning rate (скорость обучения в алгоритмах минимизации), а также добавляя предобработку в виде PCA с различным количеством принципиальных компонент мы можем получить различные диаграммы. Для оценки качества диаграммы был разработан следующий алгоритм.

Пусть V – множество точек в пространстве, полученном после преобразования tSNE. Назовем ближайшим соседом для данной вершины $v \epsilon V$ точку в конечном пространстве u $(u \neq v,\ u \in V)$, такую, что функция расстояния $dist(u, v)$ принимает минимальное значение. Посмотрим, какой класс имеет ближайший сосед.

Естественным образом задается следующая целевая функция:

$$cnt\left(v \epsilon V \mid class\left(\min_{u \in V} dist(u, v)\right) ! = class(v)\right). \quad (1)$$

Выберем диаграмму, при которой достигается минимум этой функции. Для большей наглядности перейдем от абсолютных значений к относительным. А именно, разделим получившееся по формуле (уравнение 1) значение на общее количество точек. Также удобно перейти к обратной величине, вычтя результат из единицы и сведя задачу к максимизации. Таким образом будем не минимизировать ошибку, а максимизировать точность.

Наилучший результат достигается для данных z и x компонент, при параметрах, learning rate = 200, perplexity = 100, без PCA. На рис. 2(а) представлена полученная диаграмма.

На диаграмме видно, что все предполагаемые фазы отделены хорошо и значение функции оценки качества достаточно высоко (0,880). Это еще раз подтверждает правильность разбиения. Однако сами по себе результаты, полученные в tSNE не могут считаться доказательством. Действительно, функция качества все ещё основана на предположении о разбиении. Поэтому она оценивает лишь соответствие диаграммы предположению.

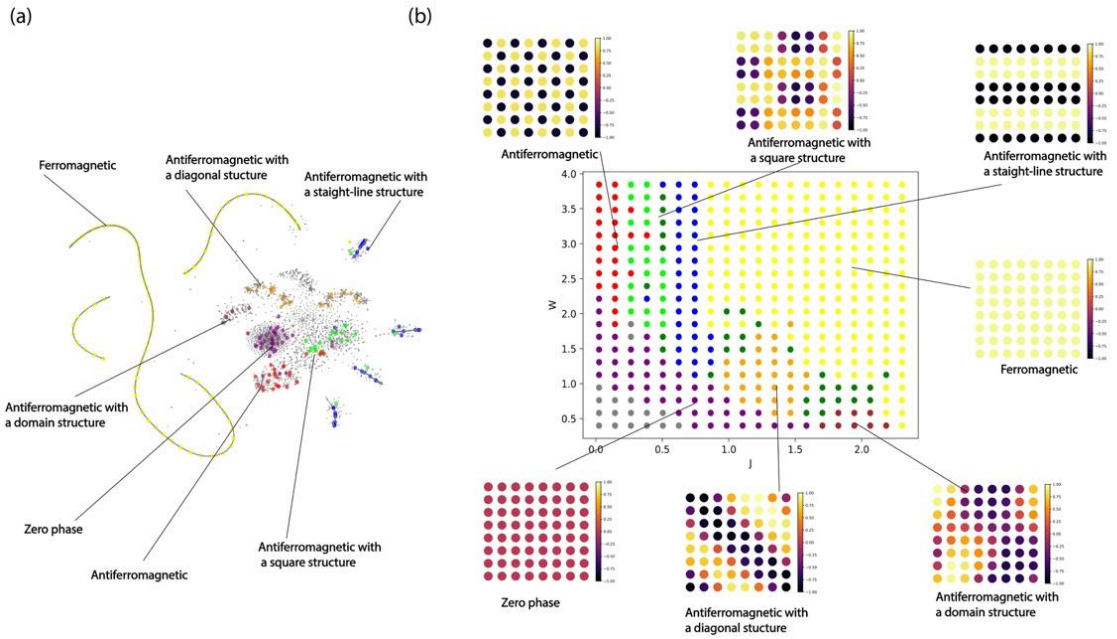


Рис. 2. (a) tSNE диаграмма, с отмеченными на ней фазами (b).
Первое приближение фазовой диаграммы, с предполагаемыми фазами

Другим полезным анализом стало обозначение отмеченных фаз в координатах J W, показанное на рис. 2(b). Из диаграммы видно, что объекты, которые, как мы предполагаем, относятся к одной фазе, занимают непрерывные отдельные области на фазовой диаграмме. Это дает возможность надеяться, что области были выделены правильно. Однако полученная диаграмма субъективна и её можно лишь сравнивать с объективными результатами машинного обучения.

Задача разбиения на фазы схожа с задачей кластеризации. Для построения объективной версии фазовой диаграммы использовался метод Agglomerative clustering. Agglomerative clustering относится к иерархическим алгоритмам кластеризации. Метод рекурсивно объединяет пары кластеров, при этом функцию расстояния между парами кластеров увеличивается минимально [3].

Применяя метод agglomerative clustering возможно изменение способа подсчета расстояния между кластерами и метрики между векторами, а также, как и в случае с tSNE, возможно предварительное уменьшение размерности при помощи PCA. Таким образом, необходимо ввести функцию оценки качества получаемых диаграмм.

Несмотря на отсутствие классов для спорных фаз, есть возможность частично разметить данные (для антиферромагнетика, ферромагнетика и нулевой фазы). Имея такую частичную разметку, можно оценить, насколько алгоритм справляется с определением именно этих фаз. Введем соответствующую целевую функцию.

Пусть X – исходное множество, $X = X_{labeld} \cup X_{unlabeled}$, где X_{labeld} – размеченная часть (антиферромагнетик, ферромагнетик, нулевая фаза), а $X_{unlabeled}$, соответственно, неразмеченная. Для удобства будем считать, что все точки из неразмеченного класса имеют метку «другое». Тогда для любого $x \in X$, существуют две метки $c_1(x)$ и $c_2(x)$, полученные искусственно и после agglomerative clustering соответственно.

Тогда итоговая формула имеет следующий вид (уравнение 2).

$$\frac{1}{|X|} \cdot cnt\big(x \in X \mid c_2(x)! = c_1(x) \wedge (c_1(x) == p \vee c_2(x) == p)\big), \qquad (2)$$

где p по очереди принимается равным метке каждого из известных классов. Из трех полученных значений берется средняя величина. Как и в случае с оценкой tSNE удобно перейти от величины ошибок к точности, отняв полученную функцию от единицы.

Наилучшая диаграмма достигается для данных из трех компонент (x, y, z), с функцией расстояния complete и манхэттоновским расстоянием и предварительной обработкой PCA с 10 принципиальными компонентами. Итоговая диаграмма представлена на рис. 3.

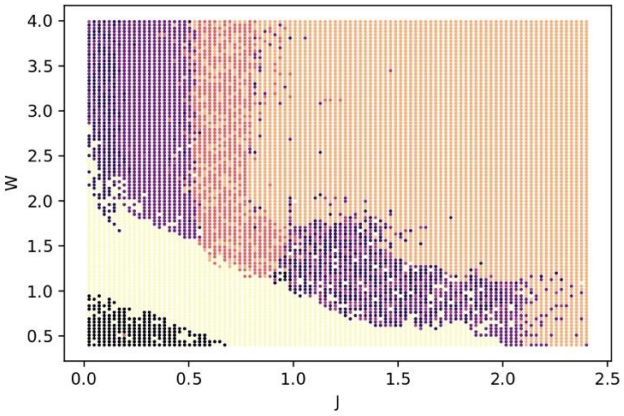


Рис. 3 Фазовая диаграмма, полученная в результате применения agglomerative clustering

Эта диаграмма практически идентична построенной ранее. На фазе выделены основные области, границы совпадают с предполагаемыми, при этом оценочная функция достигает значения 0,963. Значит ее можно использовать как отправную точку в методе learning by confusion для поиска межфазных границ.

Метод learning by confusion был впервые описан в 2017 году [4]. Его особенность состоит в том, что мы применяем методы обучения с учителем (обучение нейронной сеть) на неразмеченных данных. Однако в отличии, от нашей системы, рассматривая была стохастической, т.е. проводя расчет несколько раз при одних и тех же параметрах, можно было получить немного разные данные. Опишем принцип работы данного метода.

Пусть есть некоторый одномерный набор данных и известно, что где-то внутри есть граница фазового перехода, но не известно ее точное местоположение. Иными словами, объекты до некоторой критической отметки принадлежат к одному классу, а после нее к другому. Попробуем отыскать местоположение критической точки, разметить данные всеми возможными способами и обучить нейронную сеть на такой разметке. Проанализируем точность нейронной сети.

Когда точность будет высокой? Во-первых, когда разметка выставлена правильно. Но есть и другой случай высокой точности. Если, согласно выставленной разметке, все объекты относятся к одному классу, то сеть учится все объекты относить к этому классу, независимо от их внутренней структуры. В этом случае точность нейронной сети равна (или близка) к единице.

График зависимости точности нейронной сети от выставленной границы в итоге, будет иметь форму и пик совпадает с местом фазового перехода (рис. 4).

Формально «пик» можно описать, как место, где первая производная анализируемой функции испытывает скачок из плюса в минус. Таким образом, не имея первоначальной разметки, можно применить метод обучения с учителем и найти место фазового перехода.

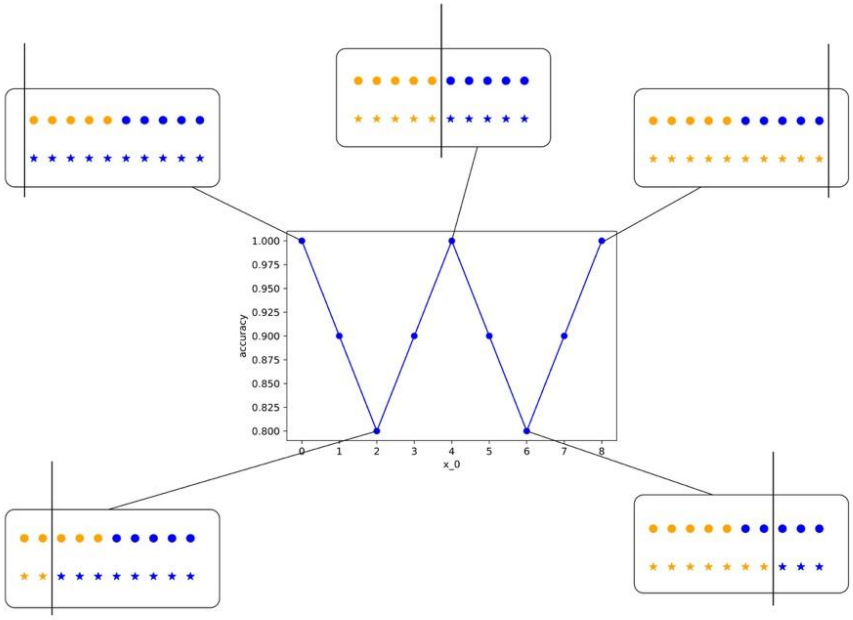


Рис. 4. Общий вид графика зависимости accuracy от выставленной границы

Применяя метод к исходным данным, получаем следующую диаграмму (рис. 5). Заметим, что границы, полученные методом learning by confusion, в целом совпадают с границами областей, обозначенных ранее. Отлично отделяются нулевая фаза, ферромагнетик, антиферромагнетики с классической, квадратичной, прямолинейной и диагональной структурой. В дальнейшем эту диаграмму можно будет уточнить, применяя другие методы машинного обучения.

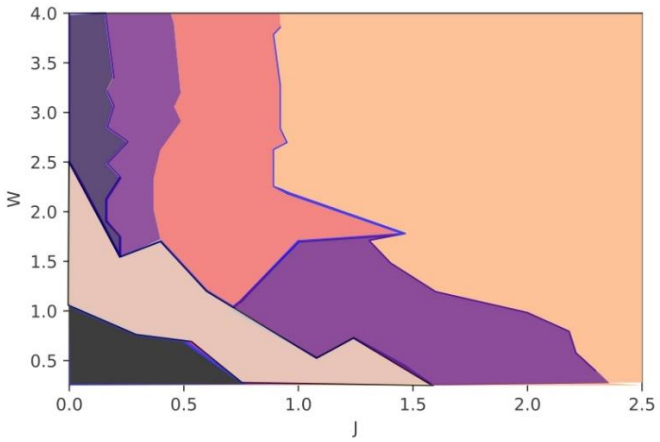


Рис. 5. Итоговая фазовая диаграмма с межфазными границами,
полученная методом learning by confusion

Таким образом, в работе достигнута основная цель – найдены новые фазы (антиферромагнетик с квадратичной, прямой и диагональной структурой). Также построена фазовая диаграмма. В дальнейшем диаграмму можно уточнить и улучшить. Работа была выполнена совместно с научным консультантом в области квантовой физики, Александром Кириенко. По его мнению, новые фазы, полученные в работе, являются интересными для области в целом и будут служить предметом дальнейшей публикации. Разбиение границ похоже на реальное и, хоть данная область в физике

является малоизученной, машинное обучение продвинуло ее. Результаты, полученные в работе, могут быть полезны не только в области квантовых оптических систем. Сам подход может считаться универсальным и быть применен в других похожих задачах.

Литература

1. Информационная страница о tSNE [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/ wiki/%D0%A1%D1%82%D0%BE %D1%85%D0%B0% D1%81%D1%82%D0% B8% D1%87%D0%B5 %D1 %81%D0%BA%D 0%BE%D0%B5_%D0 %B2%D0%BB%D0% BE%D0%B6% D0%B5%D0% BD%D0%B8%D0%B5_%D1 %81%D0%BE%D1%81%D0 %B5%D0%B4 %D0%B5%D0% B9_%D1%81_t-%D1%80%D0%B0 %D1%81%D0%BF%D1 %80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0 %B5%D0%BD% D0%B8%D0% B5%D0%BC (дата обращения: 01.04.2020).
2. Информационная страница о PCA [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D1%82 (дата обращения: 01.04.2020).
3. Информационная страница об Agglomerative Clustering [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F 82 (дата обращения: 01.04.2020).
4. Learning phase transitions by confusion Evert P.L. van Nieuwenburg, Ye-Hua Liu and Sebastian D. Huber. 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.nature.com/articles/nphys4037 (дата обращения: 01.04.2020).

Сергеева Дарья Владимировна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет технологического менеджмента и инноваций,
студент группы №U3424,
направление подготовки: 38.03.02 – Менеджмент,
e-mail: sergeevaitmo@gmail.com
Негреева Валентина Владимировна
Университет ИТМО,
факультет технологического менеджмента и инноваций,
к.э.н., доцент,
e-mail: v.negreeva@mail.ru

УДК 656.02

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ В МЕЖДУГОРОДНЕМ СООБЩЕНИИ

Д.В. Сергеева
Научный руководитель – к.э.н., доцент В.В. Негреева

Работа выполнена в рамках темы НИР: «Совершенствование организации автомобильных перевозок грузов в междугороднем сообщении».

Аннотация
В статье рассмотрены основные теоретические аспекты организации автомобильных грузоперевозок междугородним сообщением; факторы, оказывающие значительное влияние на данный процесс, логистические показатели; приведены результаты исследования Российского рынка междугородних перевозок; выполнен анализ целесообразности внедрения нового проекта для предприятия ООО «СМ-Транс СПб».
Ключевые слова
Специализированный транспорт, стратегическое планирование, текущее планирование, оперативное планирование, критерий эффективности, габариты груза, политика управления качеством, логистическое сообщение между регионами, аутсортинг, накладные расходы, амортизационные отчисления, коммерческие расходы, управленческие расходы, риски.

Логистические услуги во все времена были актуальны, однако в настоящее время, с учетом глобализации и цифровизации, грамотно выстроенная организационная структура, правильное распределение производственных мощностей и корректная коммерческая деятельность позволяют компании выйти на лидирующие позиции среди аналогичных организаций. В соответствие с этим можно выделить основную проблему, которая заключается в снижении прибыльности грузоперевозок из-за некорректного ведения производственно-хозяйственной деятельности.

Актуальность исследования обуславливается несовершенной организационной структурой автомобильных грузоперевозок междугородним сообщением.

Цель работы- рассмотреть проект внедрения автомобильных грузоперевозок на предприятии ООО «СМ-Транс СПб» с учетом уже сложившийся организационной и производственной структуры.

Задачи состоят в исследовании теоретических основ автомобильных грузоперевозок междугороднем сообщением, анализе системы управления и

обосновании рентабельности внедрения нового проекта на предприятии ООО «СМ-Транс СПб».

Автомобильные перевозки являются одним из основных путей товарооборота между странами, городами и регионами, поэтому необходимо корректно оформить весь документооборот, а также учесть условия поставки, чтобы груз дошел в целости и сохранности [2].

Основные факторы, влияющие на организацию автомобильной транспортировки-организационные (безопасность передвижения, договорные отношения с ГАИ) и экономические (затраты на перевозку).

Для перевозок грузов обычно используют специализированный транспорт. При выборе автомобиля для междугородних перевозок как правило обращают внимание на количество осей, тип прицепа, вид кузова. В случае достаточно тяжелых грузов останавливаются на тягачах с полуприцепами, а также автомобилях с повышенной проходимостью [3].

Грамотное планирование является основой в логистике для исключения простоев, порожних пробегов и других временных и денежных потерь. Выделяют следующие типы планирования грузовых перевозок: стратегическое, текущее и оперативное [2]. Следует заметить, что небольшое отклонение от графика движения, безусловно, присутствовать может, однако, не превышая заданные нормативы [1].

При планировании грузоперевозок помимо текущего планирования также используется прогнозирование возможных будущих исходов. К таким относятся непредвиденные обстоятельства или форс-мажоры. Логист, курирующий проект, должен проанализировать возможные события и последствия, чтобы быть подготовленным [3].

Логистическая компания, занимающаяся автомобильными грузоперевозками, должна проанализировать не только суммарный объем перевозок, который может быть вывезен за определенный срок, но и габариты, и характеристику грузов.

Критерий эффективности грузоперевозок зависит от поставленных задач и ожидаемых результатов. Существуют локальные (частные) и обобщенные (комплексные) критерии эффективности [5].

Помимо рассмотренных выше показателей свою роль играют: связь между объемом производственных мощностей компании и емкостью обслуживаемого сегмента потребителей, а также политика ценообразования, география размещения клиентов.

Стоит остановиться и на логистических показателях: безопасность доставки, ошибки при доставке, потери при доставке, недопоставки, коэффициент готовности поставок, коэффициент стоимости транспортного сырья, коэффициент своевременности поставок, безопасность транспортировки, потери при транспортировке [4].

Таким образом, все вышеперечисленные показатели помогают вычислить и проанализировать транспортный процесс в логистических фирмах, занимающихся междугородними автоперевозками.

Развитие транспортного сектора всегда было важно для нашей страны, так как это возможность логистического сообщения между регионами России. Рассмотрим подробнее динамику развития междугородних перевозок по России. Статистические данные были взяты с сайта Федеральной Службы Государственной Статистики.

В таб. 1 указан общий тоннаж перевозки грузов по Российской Федерации в течение 2016, 2017 и 2018 годов. Самым часто использующимся транспортом стал автомобильный. В целом, транспортировка грузов в млн. т., приняла тенденцию к увеличению по сравнению с 2016 г. Это говорит о положительной динамике развития транспортной сферы.

Таблица 1

Перевозки грузов по видам транспорта (млн. тонн)

Вид транспорта	Год		
	2016	2017	2018
Транспорт всего:	7954	8073	8144
Железнодорожный	1325	1384	1291
Автомобильный	5397	5404	5544
Трубопроводный	1088	1138	1169
Морской	25	26	23
Внутренний водный	118	119	116
Воздушный	1,1	1,3	1,3

Также стоит уделить внимание политике управления качества на предприятии. Основные критерии, на которые клиенты обращают внимание при выборе логистической компании: технические характеристики, предел цены, время и условия поставки, условия технического обслуживания, условия платежа и программа обслуживания покупателей [6].

Компания ООО «СМ-Транс СПб» существует на рынке логистических услуг с 2011 [7] года, однако, автомобильное грузосообщение по междугородним маршрутам недостаточно развито. Предлагается усовершенствовать данное направление путем введения нового проекта, который заключается в транспортировке одной машиной трех видов груза по трем направлениям соответственно: Санкт-Петербург-Ярославль, д. Дубки- Москва, Подольск- Санкт-Петербург (таб. 2).

Таблица 2

Описание проекта

Груз	Вес (т.)	Габариты	Направление
Металлоконструкции	1000	h=1,5 м.; w=2,0 м.; l=8,0 м.	СПб-Ярославль
Катушки стального каната	200	h=0,78 м.; w=0,8 м.; l=0,8 м	Дубки-Москва
Деревянные ящики с инструментом	5	h=1 м.; w=1 м.; l=1 м.	Подольск-Санкт-Петербург

После первичного расчета ставки по данному проекту, получили стоимость, равную 62 108 руб. без НДС, что в два раза ниже, чем у конкурентов. Однако в стоимость не были включены накладные, управленческие и коммерческие расходы, таким образом, убыток от продаж за весь период составил бы 3 246 050 руб.

Существует несколько вариантов улучшения условий внедрения:

- Учет расходов по технике по другому проекту;
- Максимальное приближение к ставке аналогичных логистических компаний;
- Использование аутсортинга.

При изменении базы накладных расходов и отнесении расходов по технике на другие проекты, резко возрастает их стоимость, снижается рентабельность и

увеличивается материальная нагрузка.

При передаче проекта на аутсортинг общая стоимость за одну перевозку составит: 132 200 руб. без НДС. При расчете общей стоимости не учитывались постоянные накладные расходы. Понесенный убыток от выплаты амортизационных отчислений и содержания техники составит 1 122 310 руб. за весь проект.

В третьем случае можно увеличить стоимость перевозок в соответствие с величиной накладных расходов.

Таким образом, после перерасчета тарифной ставки по третьему варианту, общая стоимость перевозки при использовании собственного автопарка существенно возросла по сравнению с первоначальной в 2 раза. При расчете была уменьшена прибыль на 10 % (и составила 20 %), а также включены дополнительные расходы: накладные, управленческие, коммерческие (дополнительная плата по ПЛАТОНу).

Для выхода компании «СМ-Транс СПб» на лидирующие позиции среди конкурентов, необходимо снизить ставку. Однако, существенное снижение стоимости проекта ведет к значительным убыткам, которые опасны недостатком основных средств, неплатежеспособностью и банкротством. Чтобы оптимизировать затраты по проекту, можно частично перенести значение накладных расходов на другие проекты, тем самым, не создавая большой материальной нагрузки на них.

После уменьшения амортизационных отчислений и расходов на содержание техники, получаем стоимость проекта, которая ниже, чем у двух конкурентов (рис. 1).

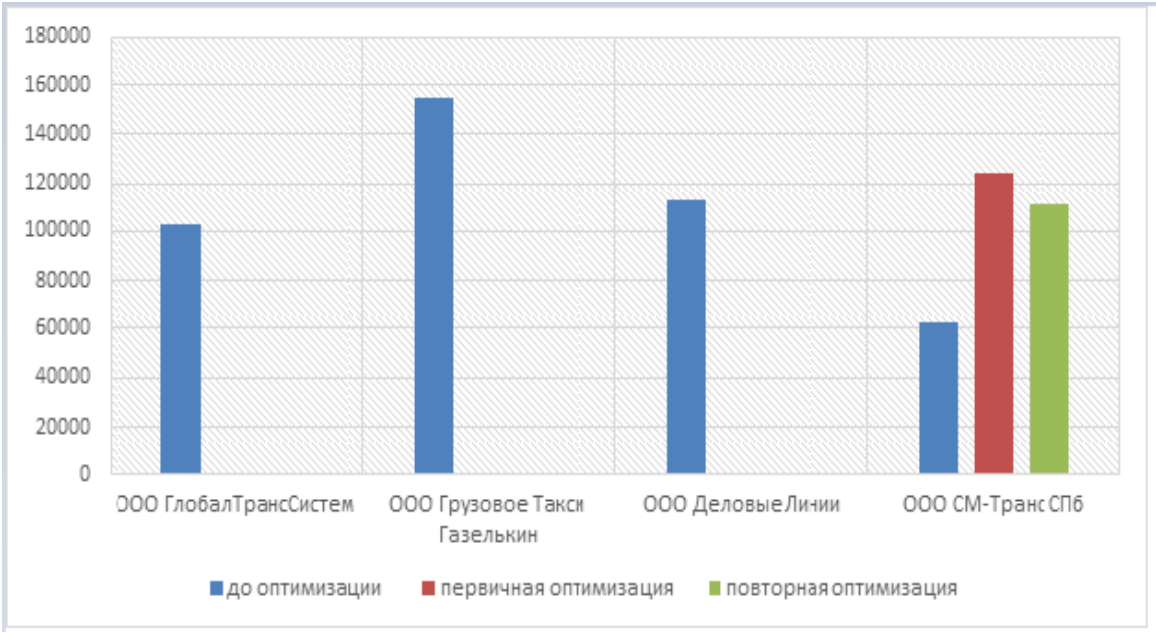


Рис. 1. Сравнение цен с конкурентами до и после оптимизации

Таким образом, распределив 660 тыс. руб. по остальным проектам, компания получит незначительное повышение ставок по остальным проектам, которое не создаст сильной материальной нагрузки. Также, после повторной оптимизации у компании есть шансы занять лидирующие позиции на рынке среди аналогичных организаций, так как стоимость проекта будет среднерыночной. Это позволит удержать клиентов и получить желаемый проект.

Существуют определенные риски от внедрения проекта, которые представлены в таб. 3.

Таблица 3

SWOT- анализ рисков проекта

Сильные стороны	Слабые стороны
-увеличение прибыли -выход на лидирующие позиции среди конкурентов -развитие междугороднего грузосообщения	-внеплановый ремонт техники -повышение цен на топливо
Угрозы	Возможности
-потеря клиентов -снижение прибыли	-получение новых проектов -возможность расширения сферы деятельности

Из таблицы видно, что риски довольно высоки, к самым опасным можно отнести потерю клиентов, снижение прибыли, и как следствие- банкротство.

Однако, все транспортировки грузов осуществляются только при наличии действующего договора транспортной экспедиции. Как правило, в данном документе прописаны условия поставки. В случае, если клиент решит отказаться от перевозчика по каким- либо причинам, то он должен будет выплатить логистической компании определенную сумму денежных средств для покрытия расходов от отказа. Также, логисту, курирующему проект, для поиска новых клиентов необходимо будет обратиться на сайт компании ati.ru, где будет происходить поиск новых клиентов по тем же направлениям.

Таким образом, для внедрения проекта по междугородним перевозкам на предприятии «СМ-Транс СПб» необходимо в первую очередь обратить внимание на производственные показатели, на планирование и составление наиболее оптимального маршрута, а также на готовность самого предприятия принять на себя дополнительные накладные расходы, так как для реализации желательно иметь достаточную сумму оборотных средств, так как оплата от клиентов поступит по факту оказанных работ.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 26.03.2020) "О Правилах дорожного движения" (вместе с "Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения").
2. Аникин Б.А., Тяпухин А.П. Коммерческая логистика: Учебник. М.: Издательство «Проспект». 2016. С. 418.
3. Быкова О.В., Заруднев Д.И. Стоимостные и технико-эксплуатационные показатели выбора грузовых автотранспортных средств // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. №5. С. 142-147.
4. Канке А.А., Кошевая И.П. Основы логистики: Учебное пособие. М.: Издательство «Кнорус». 2013. С. 576.
5. Поваров Е.Н., Поспелова Л.Н. Грузовые перевозки: быстрее, дальше, эффективнее // Актуальные проблемы развития транспорта. 2016. С. 120-126.
6. Шамилева Э.Э., Фазылова Н.Н. Управление качеством продукции на предприятиях // Международный научный журнал «Символ Науки». 2015. №11. С. 198-200.
7. [Электронный ресурс] URL: https://egrul.nalog.ru/index.html (дата обращения: 25.06.2020).

Туманян Ирина Акоповна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
студент группы №Т3415,
направление подготовки: 19.03.02 – Продукты питания из растительного сырья,
e-mail: itumanyan@mail.ru
Соболева Елена Викторовна
Год рождения: 1960
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
к.т.н., доцент, сотрудник подразделения международный научный центр "Биотехнологии третьего тысячелетия"; преподаватель (квалификационная категория "преподаватель")
e-mail: elenavsoboleva@mail.ru

УДК 664.661.3

РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ И ОЦЕНКА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ХЛЕБА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОБАВОК

И.А. Туманян
Научный руководитель –к.т.н., доцент Е.В. Соболева

Аннотация
В работе описан способ обогащения хлеба йодом и селеном для получения функционального продукта в целях предупреждения йододефицита у населения. Установлено, что при внесении в тесто 0,9916 г порошка «Ламина Форте» из водоросли ламинарии и 17,5 таблеток биологически активной добавки «Селен-Актива» содержание йода и селена в 250 г хлеба составит 200 мкг и 115 мкг, соответственно, что соответствует верхней допустимой норме потребления рассматриваемых микроэлементов.
Ключевые слова
Йод, йододефицит, селен, хлеб, суточная норма потребления.

Известно, что йод является одним из наиболее важных микроэлементов для человека, функция которого заключается в синтезе гормонов щитовидной железы. Рекомендованное суточное потребление йода для взрослого человека, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), составляет 150 мкг, и недостаточное его поступление вместе с пищей приводит к серьёзным заболеваниям щитовидной железы, среди которых выделяют эндемический кретинизм, эндемические нейрокогнитивные нарушения, неонатальный зоб, зоб, в том числе с осложнениями, гипотиреоз, замедленное физическое развитие, нарушение психической функции и многие другие. Именно проблема йододефицита является серьёзной проблемой здравоохранения, которая затрагивает и развитые страны мира [1]. По данным Глобальной сети по борьбе с дефицитом йода, в 2017 году во многих европейских странах потребление йода не достигает рекомендованной ВОЗ дозы.

Однако несмотря на достаточное потребление йода развитие и функция щитовидной железы могут быть нарушены сопутствующим дефицитом селена. Селен необходим для биосинтеза селенопротеинов, которые участвуют в антиоксидантной защите и окислительно-восстановительном контроле транскрипции [2]. Селен-

зависимые йодтирониндейодиназы продуцируют активный тиреоидный гормон, трийодтиронин, из его неактивного предшественника, тироксина [3]. Селен в форме глутатионпероксидазы защищает клетки щитовидной железы от пероксида водорода. В одном исследовании удалось определить, что распространённость патологических состояний щитовидной железы выражалась в значительно меньшей степени в регионах с адекватным суточным потреблением селена. Поэтому, его достаточное поступление в организм человека также важно для рассматриваемого органа [4].

В исследовании, проведённом в городе Санкт-Петербурге, удалось определить, что несмотря на широкую доступность морских продуктов питания, значение медианы йодурии у обследованного взрослого населения соответствовало йододефициту лёгкой степени тяжести (91,2 мкг/л) [5]. К настоящему моменту времени в продуктовых магазинах можно встретить огромное разнообразие продуктов питания функционального назначения, которые занимают особое место в жизни некоторых слоёв населения. Функциональные продукты питания, содержащие селен и йод, представлены в виде какао, кофе, суп-крема, яиц куриных, пюре картофельного, хлеба, драже, кисели, молочных продуктов, мяса, масла. Хлебобулочные, как массовый продукт питания, при этом не имеют комбинацию добавок селена и йода. В связи с этим целью настоящей работы является разработка рецептуры и оценка потребительских свойств хлеба с использованием добавок йода и селена.

Итак, в качестве функциональных добавок выбраны пищевой продукт «Ламина Форте» – порошок зеленовато-коричневого цвета из водоросли ламинарии с массовой долей йода равной 0,24%, соответствует ТУ 10.89.19-002-06676922-2018, ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции», ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции» – и биологически активная добавка (БАД) «Селен-Актив» в виде таблеток, в составе которого входят сорбит (подсластитель), аскорбиновая кислота, кальций стеарат, «Селексен» (селеноксантен – органический источник селена), как источника йода и селена, соответственно. Преимуществами этих добавок перед другими добавками йода и селена состоят в том, что они:

- ✓ всегда имеет известную массовую долю вещества;
- ✓ удобно дозируются;
- ✓ равномерно перемешиваются с ингредиентами во время замеса теста;
- ✓ необходимы в очень малом количестве для приготовления хлеба;
- ✓ не имеют какого-либо влияния на качественные показатели готового изделия.

Кроме того, по результатам литературного анализа выяснилось, что порошок «Ламина Форте» ещё не подвергался исследованию в области хлебопечения в качестве функциональной добавки. Этот факт также стал определяющим при выборе данного порошка среди других источников пищевой добавки йода. БАД «Селен-Актив» была выбрана прежде всего исходя из факта того, что в ней содержится определённое и известное количество селена в отличие от продуктов питания, имеющих в своё составе селен (например, бразильские орехи). Это в огромной степени облегчает расчёт количества добавки для приготовления хлеба. Если рассматривать другие методы фортификации хлебобулочных изделий селеном, то использование метода замачивания зёрен также не может быть применён в обогащении селеном хлеба, поскольку есть огромная вероятность, что используемые зёрна накопили бы в себя недостаточное или избыточное концентрации селена, что может привести к неточным расчётам вносимого селена.

Объектом исследования являлся формовой хлеб из пшеничной муки высшего сорта, рецептура которого приведена в таб. 1. Образец с добавками йода и селена называться опытный образец, а без добавок – контрольный. Технологическая схема производства представлена на рисунке. Тесто готовили безопарным способом.

Таблица 1

Нормативная рецептура хлеба

Наименование сырья	Количество, кг
Мука пшеничная хлебопекарная высшего сорта	100,0
Дрожжи хлебопекарные прессованные	2,0
Соль поваренная пищевая	1,5
Сахар белый	5,0
Масло подсолнечное	4,0
Итого	112,0

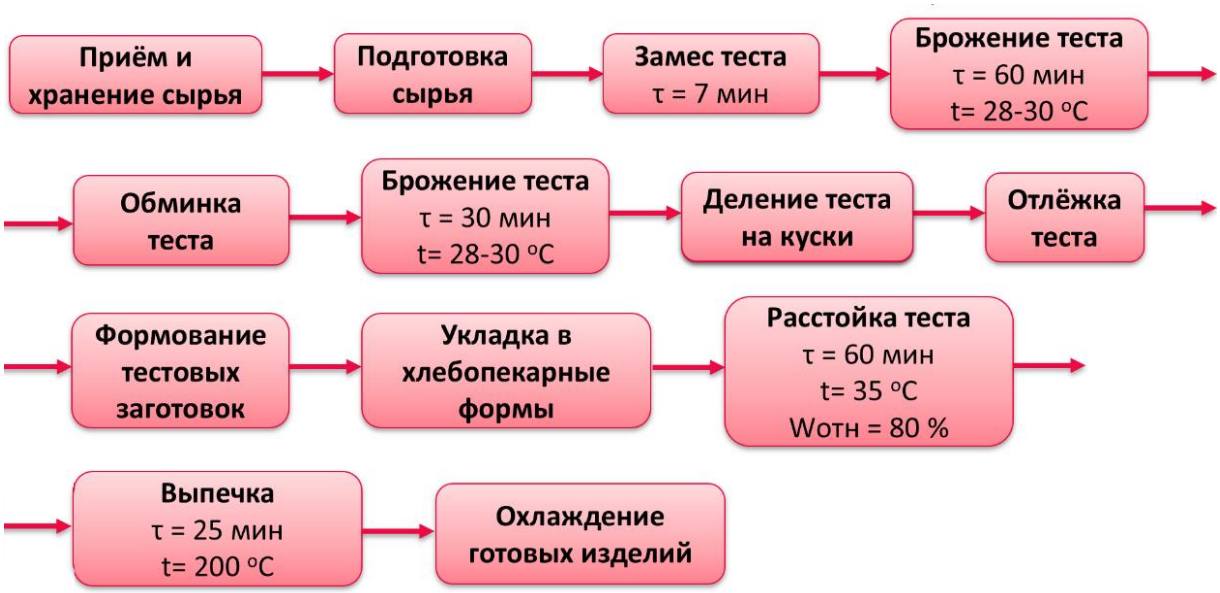


Рисунок. Технологическая схема приготовления хлеба

Функциональные добавки селена и йода вносились во время замеса теста, количество которых было рассчитано на основании 2-х критериев:

- ✓ суточной норма потребления микроэлементов взрослым человеком;
- ✓ сведений из литературных источников.

Известно, что суточная норма потребления хлеба составляет 250 г, тогда необходимо приготовить такой хлеб, чтобы при употреблении 250 г которого в организм поступали суточные нормы йода и селена. В тесто необходимо вносить в 2 раза больше добавок, поскольку, согласно литературным источникам, под действием высокой температуры около 50% этих микроэлементов теряется. Таким образом, для получения 250 г хлеба с 200 мкг йода и 75 мкг селена необходимо вносить в тесто 400 мкг и 150 мкг йода и селена, соответственно. При использовании «Селен-Актива» необходимая доза рассчитывается легко: в 1 таблетке содержится 50 мкг селена, т.е. для получения 150 мкг селена необходимо использовать 3 таблетки БАДа. В случае с пищевой добавкой «Ламина Форте» важно также учитывать тот факт, что массовая доля йода в ней составляет 0,24%, что означает, что в 100 г продукта содержится 240 мг йода. Следовательно, путём составления пропорции получаем, что 400 мкг (0,4 мг) йода содержится в 0,17 г порошка.

Для расчёта количества добавок на производство хлеба из 1 кг муки сначала необходимо рассчитать их содержание на 100 кг муки с учётом выхода хлеба в контрольном образце. Выход хлеба составляет 145,82 кг. Расчёт количества добавок на 100 кг муки производится с использованием следующих пропорций:

✓ БАД «Селен-актив»:
145,82 кг – x
0,25 кг – $1,5*10^{-7}$ кг
x = 0,000087492 кг = $8,7492*10^{-5}$ кг.
✓ Порошок «Ламина Форте»:
145,82 кг – x
0,25 кг – 0,00017 кг
x = 0,0991576 кг = 0,09916 кг.

Полученные значения необходимо уменьшать в 100 раз. Таким образом, для приготовления хлеба из 1 кг муки необходимо вносить 874,92 мкг, т.е.17,5 таблеток БАДа «Селен-Актив», и 0,992 г порошка «Ламина Форте».

По органолептическим показателям оба образца хлеба соответствовали данному виду изделия, не наблюдались существенные расхождения между двумя образцами, кроме небольших изменений цвета мякиша и запаха хлеба в опытном образце, связанные из-за присутствия порошка «Ламина Форте» в составе рецептуры. По физико-химическим показателям, указанные в таб. 2, массовая доля влаги, кислотность и пористость у обоих изделий соответствуют норме. Существенных различий в качественных показателях, а также в упёке и удельном объёме хлеба между двумя образцами не обнаружено.

Таблица 2

Физико-химические показатели готовых изделий

Наименование показателя	Единица измерения	Норма	Значение	
			контрольный образец	опытный образец
Массовая доля влаги хлеба	%	от 34 до 42	38,5	39,0
Кислотность	град	от 2 до 5	3,5	3,9
Пористость	%	от 60 до 75	70,53	66,91
Удельный объём формового хлеба	мл на 100 г	-	3,025	2,93
Упёк	%	-	7,6	8,1

По результатам анализа опытного образца хлеба установлено, что содержание селена в нём, согласно ГОСТ 31707-2012, составило 115 мкг/250 г хлеба, что оказалось на 40 мкг больше суточной нормы потребления, при этом полученное значение входит в верхний допустимый уровень потребления селена взрослым человеком. Содержание йода не удалось определить экспериментальным путём. Можно предположить, что его содержание равно половине внесённого количества йода в тесто, как и в литературных источниках, то есть около 200 мкг в 250 г хлеба. Следовательно, содержание селена и йода в готовом изделии соответствуют верхнему допустимому уровню их потребления.

Таким образом, в качестве функциональных добавок были выбраны «Ламина Форте» и БАД «Селен-Актив» для обогащения йодом и селеном, соответственно, которые были внесены в тесто во время его замеса. Их количество составило 0,992 г «Ламина Форте» и 874,92 мкг «Селен-Актива». Хлеб с внесёнными добавками соответствовал показателям качества хлеба. Определено содержание селена в опытном образце экспериментальным путём, которое составило 115 мкг на 250 г хлеба, а йода – теоретическим – 200 мкг.

Ввиду того, что применённые добавки не ухудшают качественные показатели хлеба, имеют свойство равномерного перемешивания с компонентами теста и

обогащают готовый продукт йодом и селеном, то можно утверждать, что эти добавки перспективно применять для обогащения хлеба. Данная тема требует дальнейших исследований для установления наиболее точной дозировки добавок, в том числе и определения содержания йода в образце экспериментальным путём, для получения продукта функционального назначения для предупреждения йододефицита у населения и, как следствие, болезней щитовидной железы.

Литература

1. Zimmermann M.B. The importance of adequate iodine during pregnancy and infancy // World Rev Nutr Diet. 2016. V. 115. P. 118–124.
2. Li F., Lutz P.B., Pepelyayeva Y., Arnér E.S., Bayse C.A., Rozovsky S. Redox active motifs in selenoproteins // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. V. 111. №. 19. P. 6976–6981.
3. Rayman M.P. Selenium and human health // The Lancet. 2012. T. 379. №. 9822. P. 1256–1268.
4. Wu Q., Rayman M.P., Lv H., Schomburg L., Cui B., Gao C., Chen P., Zhuang G., Zhang Z., Peng X., Li H., Zhao Y., He X., Zeng G., Qin F., Hou P., Shi B. Low population selenium status is associated with increased prevalence of thyroid disease // The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism. 2015. V. 100. №. 11. P. 4037–4047.
5. Соболева Д.Е., Дора С.В., Каронова Т.Л., Волкова А.Р., Гринева Е.Н. Обеспеченность йодом взрослого населения Санкт-Петербурга // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2017. Т. 13. № 4. С. 23–29.

Щедрина Надежда Николаевна
Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы №L3416,
направление подготовки: 12.03.05 – Лазерная техника и лазерные технологии,
e-mail: schedrina.nadezda@gmail.com
Одинцова Галина Викторовна
Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н., н.с.,
e-mail: gvodintsova@itmo.ru

УДК 532.64, 544.032.65

ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Н.Н. Щедрина
Научный руководитель – к.т.н., н.с. Г.В. Одинцова

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления 218 от 09.04.2010 г., Соглашение №075-11-2019-066 от 22.11.2019 г.

Аннотация
В работе рассмотрено лазерное управление смачиванием поверхности нержавеющей стали AISI 430. Определено влияние внешних факторов на изменение угла смачивания. Разработан одноэтапный метод лазерного формирования структур для направленного течения жидкости путем комбинирования гидрофильных и супергидрофильных областей. Продемонстрированно создание различных элементов для сложных траекторий направленного течения капли.
Ключевые слова
Лазерная микро- и нанообработка, лазерное структурирование, управление смачиванием, направленное течение жидкости.

На сегодняшний день большой интерес представляет возможность контроля такого свойства поверхности как смачивание. Существуют гидрофильные и гидрофобные поверхности, используемые для различных применений. Одной из интересных областей применений смачиваемых поверхностей является направленное течение жидкости, при котором, уменьшая поверхностную энергию системы и, следовательно, уменьшая угол смачивания, возможно задать нужную траекторию течения капли [1]. Направленное смачивание и течение жидкостей на поверхности материалов, в частности металлов, активно исследуется в микрофлюидике [2], для создания химических сенсоров [3], при изучении биомолекулярных взаимодействий и других перспективных применений.

В настоящее время направленное смачивание на металлах реализуется путем электрохимического метода [4] и химического травления [1] Однако эти методы, а также существующие немногочисленные лазерные методы представляют собой сложные многоэтапные процессы [5]. Также существующие методы позволяют

перемещать капли только в прямом направление на расстояние не больше 7 мм, что делает невозможным их использование в ряде перспективных применений.

Целью данной работы стало создание одноэтапного метода лазерного формирования структур для направленного течения жидкости на поверхности нержавеющей стали AISI 430 путем создания градиента смачивания. Для достижения цели были сформулированы задачи: получить структуры с различной микрогеометрией на поверхности стали AISI 430 с помощью лазерного структурирования и исследовать зависимость полученной геометрической формы и химического состава поверхности от режимов лазерного воздействия; определить влияние различных режимов лазерного структурирования на смачивание поверхности; исследовать влияние внешних факторов на изменение смачивания поверхности; создать градиент смачивания на структурированной поверхности путем комбинирования областей с различной степенью гидрофильности.

В качестве экспериментальных образцов использовались пластины из нержавеющей стали AISI 430 толщиной 0,5 мм. Структурирование образцов проводилось на воздухе с использованием технологической установки на базе импульсного иттербиевого волоконного лазера. Морфология поверхностей изучалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Zeiss Merlin и с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) NanoEducator. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA с фокусировкой по Брэггу-Брентано. Для измерения угла смачивания использовался метод лежачей капли. В качестве тестовой жидкости использовалась дистиллированная вода объемом 3,5 мкл,

Для определения влияния температуры на морфологию поверхности и контактного угла в качестве переменных параметров лазерного воздействия были выбраны плотность мощности q и перекрытие отпечатков лазерных импульсов вдоль горизонтальной L_x и вертикальной L_y осей сканирования. При плотности мощности лазерного излучения 169,8 МВт/см^2 и выше, на краях образованных углублений появляются застывшие брызги расплавленного металла, что происходит из-за процесса интенсивного испарения металла с поверхности. Была получила зависимость, демонстрирующая, что при увеличении плотности мощности и перекрытии импульсов лазерного излучения имеется тенденция к уменьшению угла смачивания (рис. 1).

Проведенные измерения шероховатости поверхности образцов, а также рентгеноструктурный анализ фазового состава образцов с различными параметрами лазерного облучения показали, что при повышении температуры обработки образовывались новые оксиды металлов, которые в чистом виде являются гидрофильными, а также увеличивалась шероховатость поверхности, что в соответствии с уравнением Венцеля также приводит к гидрофильности. Таким образом, можно сказать, что угол смачивания уменьшается как из-за увеличения шероховатости поверхности, так и из-за образования гидрофильных оксидов.

Другим важным свойством оксидов металлов является предрасположенность к адсорбции гидрофобных органических соединений из окружающей среды. Это подтверждается экспериментами, где после выдержки образцов на воздухе в течение 1 года, а также после низкотемпературного отжига (100°C, 3 часа) углы смачивания структурированных образцов значительно увеличивались. При этом, при помещении образцов в ультразвуковую ванну с дистиллированной водой на один час при температуре 28 °C, углы смачивания значительно уменьшались, возвращаясь в своим первоначальным значениям. Органические соединения, адсорбированные поверхностями образцов, были смыты, что объясняет наблюдаемые результаты.

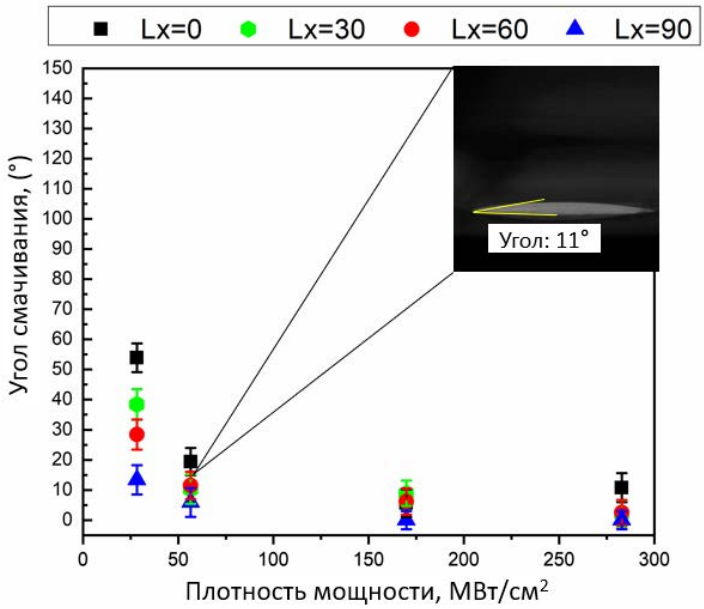


Рис. 1. Зависимость угла смачивания от плотности мощности для различных перекрытий; объем капли 3,5 мкл; L_x=L_y

После того, как была определена зависимость влияния лазерного излучения на свойства смачивания поверхности, была поставлена задача получения структуры, на которой возможно осуществить направленное течение жидкости путем увеличения гидрофильности стали до 0°. Из проделанных многочисленных экспериментов были выбраны 6 режимов лазерного воздействия (образцы h1-h6), с углами смачивания от 65° до 0°, с определенной морфологией с перекрытием 0% и 60% и изменением плотности мощности от 19,2 МВт/см^2 до 181 МВт/см^2 (рис. 2).

Таким образом, был сформирован градиент смачивания с дискретностью поверхности в среднем 6,4 градуса на мм. При этом изменение угла смачивания неравномерное, т.к. в начале структуры необходимо инициировать движение капли.

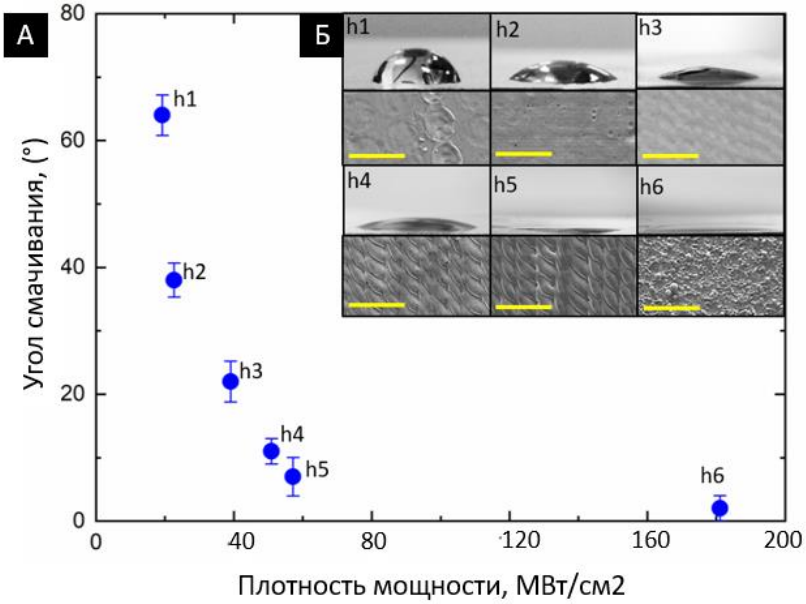


Рис. 2. А) Зависимость контактного угла областей образца с градиентом смачивания от плотности мощности; Б) фотографии капель и СЭМ изображения структур с масштабом 40 мкм

Морфология поверхности образцов h1-h6 приведена на СЭМ изображениях на рис. 2Б и профилограммах, сделанных с помощью СЗМ, представленных на рис. 3Б. Был построен график зависимости угла смачивания образцов от фактора шероховатости (рис. 3А) демонстрирующий, что с увеличением шероховатости, поверхность приобретает гидрофильные свойства.

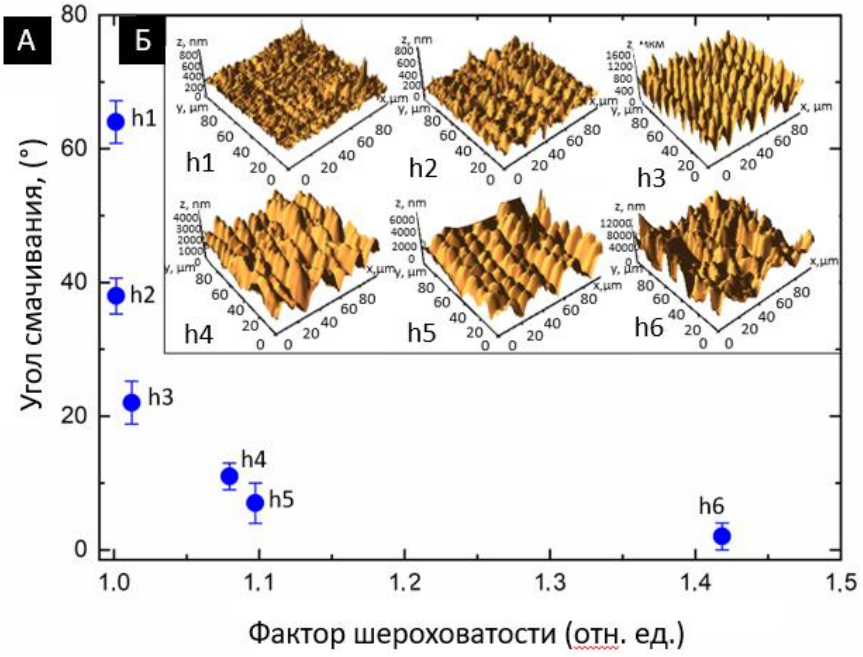


Рис. 3. А) Зависимость угла смачивания областей образца с градиентом смачивания от фактора шероховатости r; Б) СЗМ изображения поверхности областей образца с градиентом смачивания

Затем был изготовлен образец, состоящий из прямоугольных областей h1-h6, расположенных в направлении увеличения гидрофильности (то есть уменьшения угла смачивания). Размер каждой области h1-h5 составил 4 мм×2 мм, размер области h6 – 4 мм×7,5 мм (рис. 4). Область h6 обладает наибольшей площадью, поскольку она супергидрофильна (угол смачивания меньше 10°) и служит «отводом» воды после ее протекания через области h1-h5. Ширина областей h1-h5 в 2 мм была выбрана экспериментально, учитывая тот факт, что диаметр капли воды в 1,8 мм с используемым объемом 3,5-5 мкл должен быть приблизительно равен ширине области для направленного движения капли.

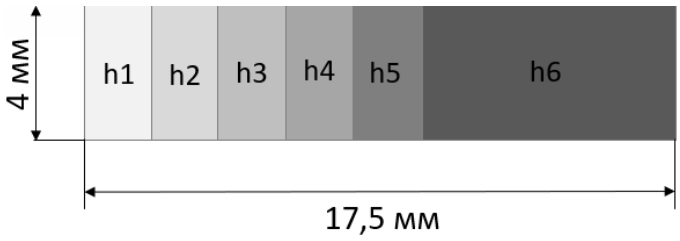


Рис. 4. Схема образца с градиентом смачивания

Во время экспериментов с направленным течением капля воды находилась на границах между точками h1 и h2, h3 и h4, h4 и h5 (рис. 5), соответственно, и перемещалась к пятну h6 с минимальным углом контакта (минимальным поверхностным натяжением). При помещении капли на границу между любыми двумя областями, жидкость смещается вправо (вдоль градиента угла смачивания) за 0,4 секунды, занимая как две начальные области, так и другие области с более низкими

углами смачивания. При этом важно отметить, что капли никогда не занимали области с более высокими углами смачивания, то есть никогда не перемещались влево. Этот факт демонстрирует направленное движение воды, происходящее спонтанно вдоль градиента поверхностного натяжения. В проведенных экспериментах скорость капли приближалась к 0,02 м/с, и рассчитывалась как перемещение правого края капли во времени.

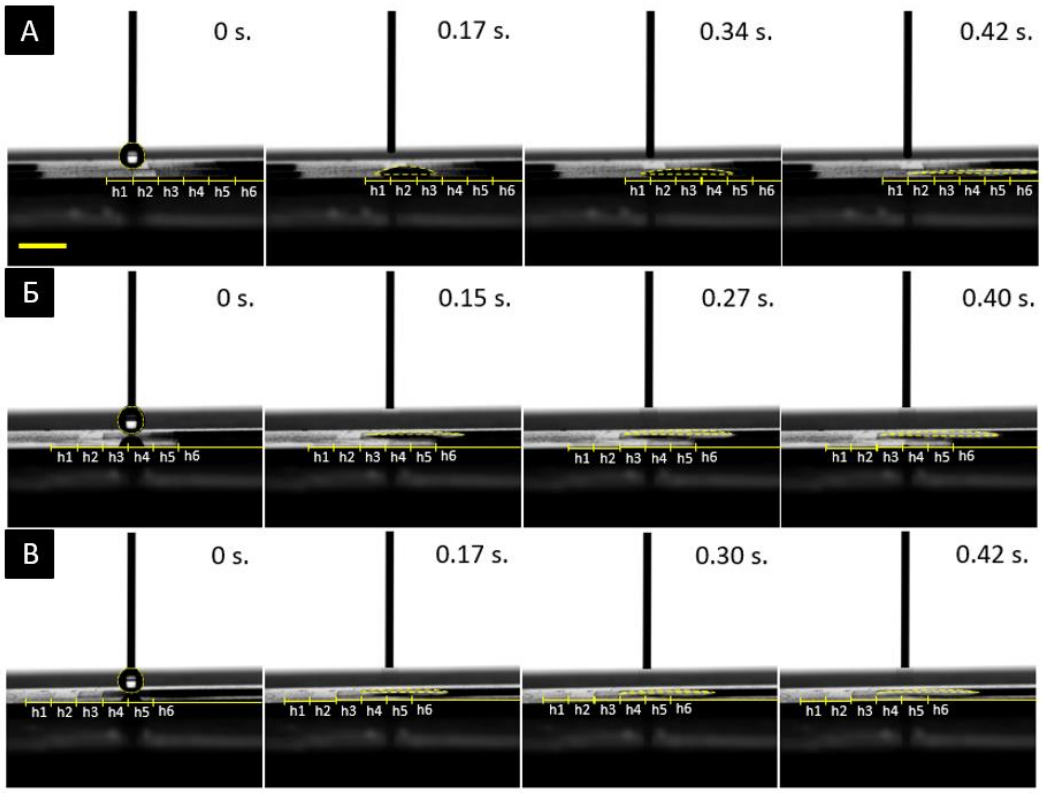


Рис. 5. Динамика распространения жидкости на образце с градиентом смачивания при помещении капли а) между областями h1 и h2, б) между областями h3 и h4, в) между областями h4 и h5 ; масштаб 3 мм

Таким образом, с помощью лазерного структурирования был успешно создан градиент смачивания на стальной поверхности, обеспечивающий направленное течение воды.

Далее были изготовлены различные элементы для более сложных траекторий течения капли, такие как поворот, разветвление, комбинированный элемент «разветвление/объединение» (огибание препятствия), представленные на рис. 6. Для их создания был использован тот же принцип градиента смачивания, при этом размеры областей h1-h6 немного отличались по ширине, как и длина области h6 (может варьироваться в зависимости от необходимого объема отвода воды).

Созданные элементы были протестированы на предмет направленности течения капли. При помещении капли объемом 3,5 мкл на границах между областями h1 и h2 жидкость перемещается в области h3-h6. Наблюдаемые скорости капли находятся в диапазоне 0,02-0,05 м/с, что согласуется с измерениями для течения капли по линейной градиентной структуре. Таким образом, в этих экспериментах были успешно протестированы элементы для направленного течения капли по сложным траекториям, что может быть использовано при создании поверхностных микрофлюидных схем и устройств.

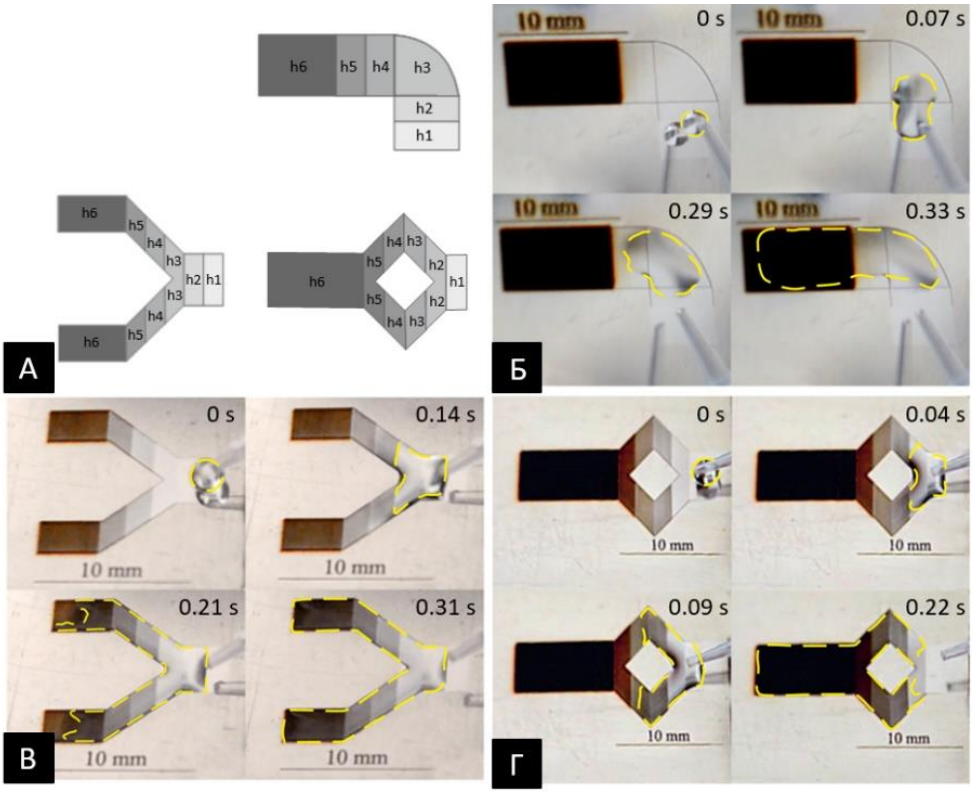


Рис. 6. Элементы для направленного течения капли на стальной поверхности:
а) схематичное изображение элементов, б) поворот, в) разветвление,
г) комбинированный элемент «разветвление/объединение»

Таким образом, в данной работе было изучено влияние морфологии и состава на свойства смачивания стали AISI 430. Был рассмотрено влияние внешних факторов на изменение угла смачивания. Переход в гидрофобное состояние происходит из-за повышенной адсорбции органических соединений оксидами металлов на структурированных поверхностях. Было показано, что гидрофобность, приобретённая за счет адсорбции органических соединений нестабильна при постоянном воздействии воды. Следовательно, для использования этих конструкций в промышленном применении требуется дополнительная защита или покрытие.

Был разработан одноэтапный легкий и высокопроизводительный метод лазерного формирования структур для направленного движения капли на расстояние 17,5 мм со скоростью до 20 мм/с, путем создания градиента смачивания. Впервые было продемонстрировано создание различных элементов для сложных траекторий направленного течения капли, которые могут быть использованы для создания микромасштабных элементов устройств направленного растекания жидкостей.

Литература

1. Yu X. et al. Surface gradient material: From superhydrophobicity to superhydrophilicity // Langmuir. American Chemical Society. 2006. Т. 22. № 10. С. 4483–4486.
2. Zhang G. et al. A surface with superoleophilic-to-superoleophobic wettability gradient // ACS Appl. Mater. Interfaces. American Chemical Society. 2014. Т. 6. № 3. С. 1729–1733.
3. Ta V.D. et al. Laser textured surface gradients // Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V. 2016. Т. 371. С. 583–589.

4. Hou Y.P. et al. Droplet manipulation on wettable gradient surfaces with micro-/nano-hierarchical structure // Chemistry of Materials. 2016. Т. 28. №. 11. С. 3625-3629.
5. Zheng Z.X. et al. Laser-Induced Wettability Gradient Surface of the Aluminum Matrix Used for Directional Transportation and Collection of Underwater Bubbles // ACS Omega. American Chemical Society. 2020. Т. 5. № 1. С. 718–725.

ЛАУРЕАТЫ I СТЕПЕНИ КОНКУРСА НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»

Александрова Мария Владимировна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
студент группы №R3425,
направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника,
e-mail: mvaleksandrova@itmo.ru, alexandrova.mar98@gmail.com
Бжихатлов Ислам Асланович
Год рождения: 1993
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
ассистент, н.с.,
e-mail: bia@itmo.ru

УДК 617.3

РАЗРАБОТКА РЕАБИЛИТАЦИОННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ДЛЯ ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

М.В. Александрова
Научный руководитель – ассистент, н.с. И.А. Бжихатлов

Работа выполнена в рамках темы НИР №619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Аннотация
В статье рассматривается необходимость индивидуального подхода к разработке экзоскелетов нижних конечностей, предназначенных для обучения и корректировки ходьбы пациентов с детским церебральным параличом (ДЦП). Проводятся анализы аналогов и заболевания. Выдвигаются требования к конструкции реабилитационного экзоскелета для пациентов с ДЦП. Приводятся результаты этапа разработки экзоскелета.
Ключевые слова
Реабилитационная робототехника, детский церебральный паралич, экзоскелет нижних конечностей, мехатронный узел, социально-ответственная робототехника, носимая робототехника.

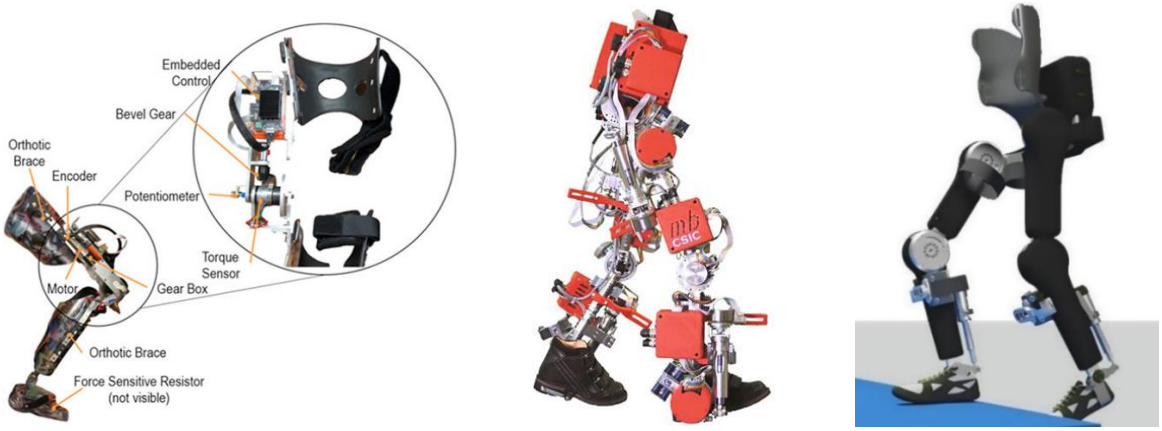
Для коррекции двигательных функций у пациентов с ДЦП, по показаниям, прибегают к назначению медикаментозных препаратов, хирургическим вмешательствам, физиотерапевтическим процедурам, массажам и лечебной физической культуре (ЛФК). Последние два должны быть на регулярной основе, а также систематичны. Один из сравнительно современных способов, относящихся к ЛФК: механотерапия – функциональное лечение с помощью механических устройств [1]. Комплексное решение в механотерапии двигательных функций - экзоскелет нижних конечностей, разработка конструкции которого и является целью работы.

Большинство представленных на рынке реабилитационных экзоскелетов предназначены для людей с парализованными конечностями вследствие спинальной мышечной атрофии. В подобных случаях, как правило, у пациента безвозвратно утрачена способность ходить. В случае же с ДЦП пациент нуждается либо в обучении ходьбе, либо в коррекции цикла шага, зависимо от степени поражения и момента

начала реабилитационных мероприятий после постановки диагноза. Основная задача реабилитации ДЦП – приспособить пациента к жизни в социуме, максимально устранить влияние психомоторных отклонений на поведение пациента. Существует достаточно большое разнообразие патологий у пациентов с ДЦП, что требует от конструкции универсальности для покрытия наиболее характерных отклонений. К основным проявлениям относятся: спастика, контрактуры связок, недостаточность и гипертонус отдельных групп мышц, аномальные установки суставов, зависимость от примитивных рефлексов и нарушения соответствия между антагонистами и агонистами [2].

Рассмотрим несколько аналогов:

1. Экзоскелет национальных институтов США (NIH) предназначен для детей с диагнозом ДЦП. Решает проблему спастичного колена, которая вызывает ходьбу на полусогнутых. Преимущество – в отличие от других экзоскелетов не задает траекторию шага пациента, а обеспечивает силовую поддержку во время всех фаз периода опоры и конечной фазы периода переноса в цикле шага, что позволяет пациенту сохранять мышечный тонус и обучаться [3]. Недостаток – решение узкой проблемы только для коленного сустава.
2. Экзоскелет ATLAS 2020, Marsi Bionics разработан для детей возраста от 4 до 12 лет с диагнозом спинальная мышечная атрофия. Преимущество – много степеней свободы (все суставы работают на сгибание-разгибание, тазобедренный сустав также на отведение -приведение, голеностопный также на супинацию-пронацию), а также малый вес – 12 кг [4, 5]. Недостаток – громоздкая и неудобная для ребенка конструкция.
3. Экзоскелет Project MARCH предназначен уже для взрослых с диагнозом спинальная мышечная атрофия. Преимущество – компактная и при этом мощная, по моментосиловым показателям, компоновка, эстетический вид и удобство для клиента. Недостаток – суставы подвижны только в сагиттальной плоскости.



а б в

Рис. 1. Внешний вид конструкций реабилитационных экзоскелетов NIH (а); ATLAS 2020 (б); MARCH (в)

– Выдвинем и поясним следующие требования к реабилитационному экзоскелету для пациентов с ДЦП:

– Требования к степеням свободы:

o Все три сустава (тазобедренный, коленный и голеностопный) должны быть подвижны в сагиттальной плоскости. Подвижность в этой плоскости направлена на перемещение конечности вперед;

- Тазобедренный сустав должен быть подвижен еще в горизонтальной плоскости, что является демпфером при ходьбе человека, и поэтому такую степень свободы важно обеспечить для людей с поврежденными суставами;
- Голеностопный сустав должен быть подвижен еще во фронтальной плоскости. Данная степень подвижности обусловлена особенностью заболевания, так как голеностопный сустав у пациентов с ДЦП в большинстве случаев находится в аномальном варусном или вальгусном положениях.

– Принципиальные требования:

- Модульность. Для того чтобы можно было в зависимости от характера поражения пациента менять силовые характеристики шарнира, конфигурировать их количество;
- Мобильность. Нестационарное устройство легче в использовании как в реабилитационном центре, так и в домашних условиях;
- Необходимо предусмотреть различные режимы тренировок в связи со спецификой заболевания: 1 режим – посуставная тренировка, направленная на увеличение амплитуды отдельного сустава, 2 режим – обучение подъему из положения сидя и обучение стоянию (что не менее динамично, чем ходьба), 3 режим – непосредственно ходьба.
- Комфорт. Необходимо выбрать подходящие материалы, обеспечить удобство во время надевания и ношения устройства, чтобы уменьшить стресс от нового типа нагрузки, а также выработать желание заниматься в тренажере.

Необходимо отметить, что разработка проводится для реального пациента с диагнозом спастическая диплегия ДЦП. Были проведены необходимы антропометрические измерения – линейные измерения тела, а также для оценки собственного момента силы, развиваемого пациентом при попытке встать из положения сидя, был проведен эксперимент с динамометром. Проводилось несколько серий эксперимента по 5 подходов. Серии отличались степенью поддержки пациента при подходе: 1 – самостоятельная попытка, 2 – с опорой руками о поручень, 3 – с опорой и поддержкой другого человека. Наблюдалась следующая динамика при выполнении каждой серии: максимальное усилие развивалось к середине подхода, после чего снова шло на снижение. Это можно объяснить неразвитой выносливостью пациента. При проектировании решено опираться на минимальное значение усилия, достигаемое при самостоятельном подъеме – 98 Нм.

Исходя из знаний роста – 178 см и веса – 56 кг пациента, для дальнейших силовых расчетов можно рассчитать массы сегментов тела по формуле:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2,$$

где:
Y- масса сегмента тела,
B_0, B_1, B_2 – постоянные коэффициенты для каждого сегмента,
X_1- вес человека,
X_2 – рост человека.

Данные о моментах в суставах во время ходьбы возьмем из статьи Колесниковой Г.П. и Формальского А.М. «Об одном способе моделирования походки человека», поскольку антропометрические данные из этой статьи достаточно близки к нашему пациенту [5]. По этому источнику момент силы во время ходьбы:

– в тазобедренном суставе принимает значения от 2 Н·м до 30 Н·м;
– в коленном суставе принимает значения от 3 Н·м до 84 Н·м;
– в голеностопном суставе принимает значения от 0 Н·м до 23 Н·м.

Рассчитаем значение наибольшего момента сил – при подъеме из положения сидя. Представим тело в момент подъема как рычажный механизм. Для того, чтобы прийти к облегченной кинематической схеме (рис. 2), сделаем несколько допущений:

1. В течение подъема угол между голенью и стопой фиксированный и равняется 75°. То есть перемещаться будут лишь бедро и туловище, когда как голень и стопа статичны.
2. Верх туловища двигается по прямой вертикали, исходящей из пяток, соответственно, в момент начала подъема угол между туловищем и бедром будет менее 90° и для нашего пациента равняется 67,5°.

Для этой схемы был составлен план скоростей, рассчитаны скорости точек, силы тяжести звеньев и определен приведенный момент, равный 170 Нм. Учитывая, что пациент способен самостоятельно скомпенсировать 98 Нм, будем рассчитывать, принимая коэффициент запаса равным 2, шарнир на подъем из положения сидя на 150 Нм.

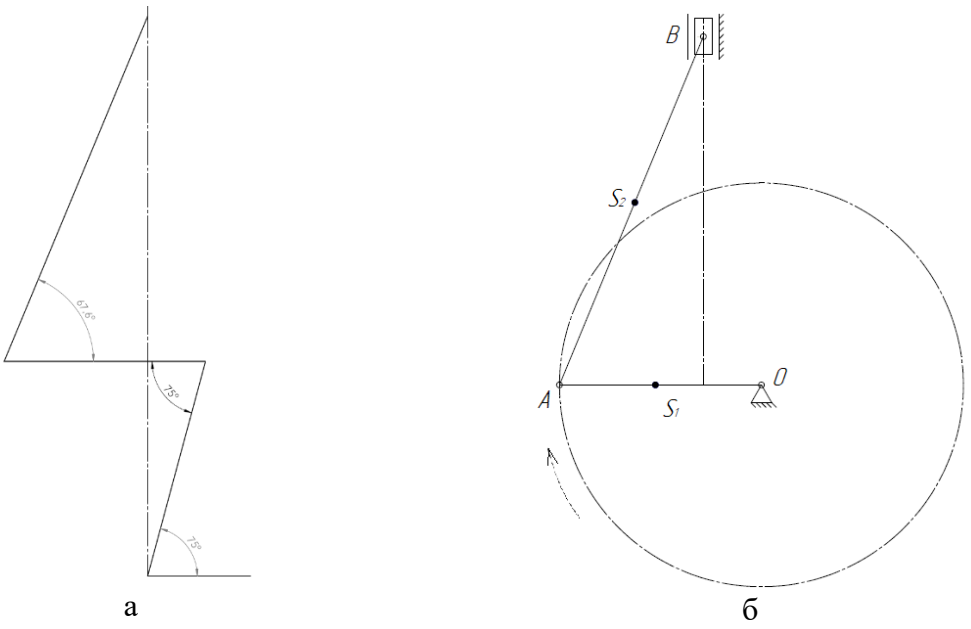


Рис. 2. Исходное положение для расчета (а) и облегченная кинематическая схема (б), где АО – бедро, АВ – туловище, S_1 и S_2 – центры тяжести звеньев

В виду унификации решено проектировать тазобедренный и коленный шарниры на одинаковое значение максимального развиваемого момента, как было выведено ранее – 150 Нм. Голеностопный шарнир решено проектировать на значение 50 Нм (23 Нм при ходьбе для пациента + коэффициент запаса).

Для того, чтобы получить оптимальное соотношение силомоментных и массогабаритных характеристик в шарнире, выберем схему мехатронного узла на базе бесщеточного двигателя прямого тока и волнового редуктора. Сначала выбирается двигатель, подходящий по габаритам и удерживаемому моменту, после чего рассчитывается передаточное число для волнового редуктора по формуле:

$$T = T_{\text{дв}} \cdot i_{\text{Р}} \cdot \eta_{\text{Р}},$$

где:
T – момент, который должен достигаться в шарнире,
$T_{\text{дв}}$ – удерживаемый двигателем момент,

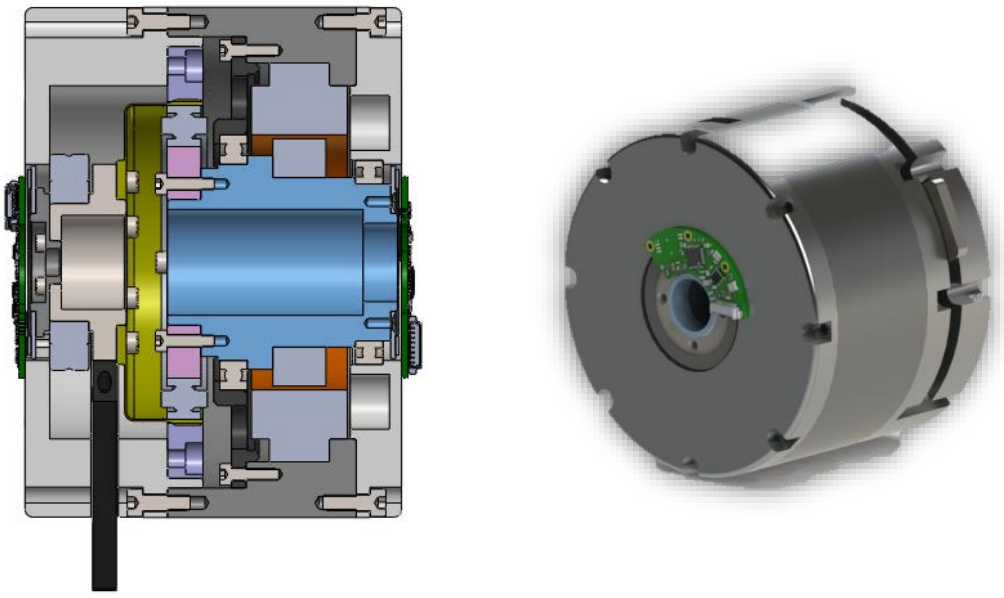
$i_{\text{Р}}$ – передаточное число редуктора,
$\eta_{\text{Р}}$ – КПД редуктора.

Двигатели были подобраны из каталога фирмы Allied Motion, Германия, а волновые редукторы из каталога китайского аналога Harmonic Drive.

Крутящий момент с двигателя передается на волновой редуктор для его повышения. С редуктором соединена выходная деталь. Для определения угла поворота вала двигателя и выходного звена также были подобраны абсолютные магнитные энкодеры фирмы Renishaw.

Для уменьшения габаритов в выходной части используется кросс-роликовый подшипник. Остальные детали предусмотрены для изготовления на токарном станке. Материал валов - 08Х18Н10Т, для остальных изготавливаемых деталей материал – Д16. Где было возможно сделаны облегчающие отверстия. Покажем на рис. 3 разрез силового шарнира и его рендеринг.

Схема компоновки голеностопа принципиально не отличается. Установлены лишь другие двигатель, редуктор, энкодеры и подшипники из-за меньших силовых параметров шарнира. Также в выходной части вращения передается одной деталью, а не двумя, поскольку позволили так сделать соотношения редуктора, энкодера и кросс-роликового подшипника.



а б

Рис. 3. Компоновка тазобедренного/коленного шарнира
и рендер тазобедренного/коленного шарнира (б)

Также выходное звено голеностопного шарнира соединяется со стелькой, которая будет закладываться в удобную для пациента обувь. В стельку интегрирован тензометрический датчик силы диапазона 0-100 кг для контроля цикла шага, а также оценки реакции опоры.

На рис. 4 покажем полученную сборку шарниров, работающих на сгибание-разгибание. Движение от шарнира к шарниру передается следующим способом: выходная деталь одного шарнира крепится к промежуточной пластине, которая жестко связана со следующим шарниром. Материал пластин – Д16. Изготавливать предлагается путем лазерной резки. Также на промежуточные детали предполагается выводить провода и устанавливать управляющие элементы, крепить фиксирующие

ремни. После чего закрывать электронику в корпус. Корпуса предполагается изготавливать литьем из полимера. Детали, держащие ремни на лазерном станке из листа Д16. Для фиксации пациента с экзоскелетом предложено использовать два ремня в бедренной части шириной 50 мм и один, но более широкий – 70 мм, ремень на голень.

Поскольку за время разработки были воплощены шарниры, работающие в сагиттальной плоскости на сгибание-разгибание конечности, необходимо доработать еще 2 степени свободы: тазобедренного сустава в горизонтальной плоскости и голеностопа на супинацию-пронацию. Также необходимо в дальнейшем выбрать компоненты электроники. Предполагаемая система взаимосвязей между имеющимися и предполагаемыми компонентами электроники разработана и представлена в виде функциональной электрической схемы Э2. Помимо управляющих элементов необходимо будет выбрать аккумулятор для питания устройства. И, наконец, разработать систему управления экзоскелетом.

Также в дальнейшем необходимо провести первые опыты ношения экзоскелета и обратить внимание на проблему удержания равновесия пациента, чтобы либо решить эту проблему на уровне системы управления экзоскелетом, либо воспользоваться сторонней помощью – брусья, костыли, системы обезвешивания. При первых же опытах ношения будут выяснены возможные недочеты разработанной конструкции и системы управления – учесть их в следующей версии скелета.

а б

Рис. 4. Схема конструкции (а) и рендер клиентского вида (б)

В заключение, хотелось бы отметить преимущество собственных разработанных шарниров, в сравнении с покупкой готовых модулей. Во-первых, покупка готовых модулей может обойтись дороже и сложнее в обслуживании, во-вторых при сборе собственных шарниров намного легче конфигурировать силовые возможности, а также выбирать оптимальную компоновку с точки зрения сборки нескольких модулей, что крайне важно при работе с разнообразной для одного заболевания клинической картиной патологий. Ориентировочная себестоимость разработки на данный момент порядка 280 000 рублей.

Литература

1. Руководство по реабилитации больных с двигательными нарушениями: Том I / Под ред. Беловой А.Н., Щепетовой О.Н. М. 1998. 224 с.
2. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. Анализ походки: Издательство НПЦ – «Стимул». Иваново. 1996. 344с.: ил. Библ – 329 назв. ISBN 5-86139-066-5.
3. Zachary F. Lerner, Diane L. Damiano, Thomas C. Bulea “A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy” // SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE NO.9 23 AUGUST 2017.
4. Daniel Sanz-Merodio, Juan Sancho, Manuel Perez and Elena Garcia “Control architecture of the ATLAS 2020 lower-limb active orthosis” // CLAWAR 2016: 19th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines London, UK, 12 –14 September, pp. 860–868.
5. Колесникова Г.П., Формальский А.М. Об одном способе моделирования походки человека. Инженерный журнал: наука и инновации, 2014. Вып.1. [Электронный ресурс]. 2020. Режим доступа: http://engjournal.ru/articles/1181/1181.pdf.

Артемьев Давид Вячеславович
Университет ИТМО,
факультет низкотемпературной энергетики,
студент группы № W3405,
направление подготовки: 16.03.03 – Холодильная, криогенная техника
и технологии жизнеобеспечения,
e-mail: david.art.kz@gmail.com
Зайцев Андрей Викторович
Университет ИТМО,
факультет низкотемпературной энергетики,
к.т.н., доцент,
e-mail: zai_@mail.ru

УДК 621.58/.59

ВЫБОР СООТВЕТСТВУЮЩЕГО КРИОГЕННОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ОЖИЖИТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Д.В. Артемьев
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.В. Зайцев

Аннотация
В данной научной работе проводится анализ, термодинамический расчёт и выбор определённого криогенного цикла среднего давления, по которому ожижитель природного газа на газораспределительной станции будет работать в оптимальном режиме, характеризующемся наибольшим коэффициентом ожижения, достигаемого в результате прикладного применения выбранного криогенного цикла в работе ожижителя.
Ключевые слова
Чжиженный природный газ, режим работы ожижителя, криогенные циклы среднего давления, газораспределительная станция, коэффициент ожижения.

Производство сжиженного природного газа (СПГ) представляет собой сегодня одну из самых развитых областей экономики Российской Федерации, темпы и масштабы которой увеличиваются с каждым годом вследствие строительства и открытия заводов по производству СПГ (СПГ–заводов), а также новых месторождений природного газа (ПГ).

Российская доля добычи СПГ в мировой экономике составляет 6%, и будет достигать 15% к 2025 году согласно расчётам Министерства Энергетики РФ. На рис. 1 изображены все крупнейшие СПГ проекты в России, в том числе и готовящиеся к запуску. На конец 2019 года суммарная мощность всех СПГ–проектов в РФ, представленных в таб. 1, составляла 28,5 млн. тонн, и в случае успеха всех будущих проектов в срок, производство достигнет 80 млн. тонн в год, в результате чего российские производители займут 15–20% от всего рынка.

Анализируя таб. 1, можно сделать вывод, что производство СПГ стремительно выросло за последнее десятилетие. Наиболее выделяется здесь проект Ямал СПГ, как самый высокопроизводительный. Предприятие Криогаз–Высоцк пока является одним из самых молодых проектов, и обладает самой низкой производительностью.

Использование СПГ на газораспределительной станции (ГРС) является целесообразным в силу того, что не нужно использовать компрессоры и затрачивать энергию для их привода, что позволяет задействовать давление газа в трубопроводе для реализации технологического цикла.

Именно по этой причине целью данной статьи является определение и выбор соответствующего криогенного цикла, обеспечивающего оптимальный режим работы ожижителя природного газа на ГРС, а именно наиболее высокий коэффициент ожижения.

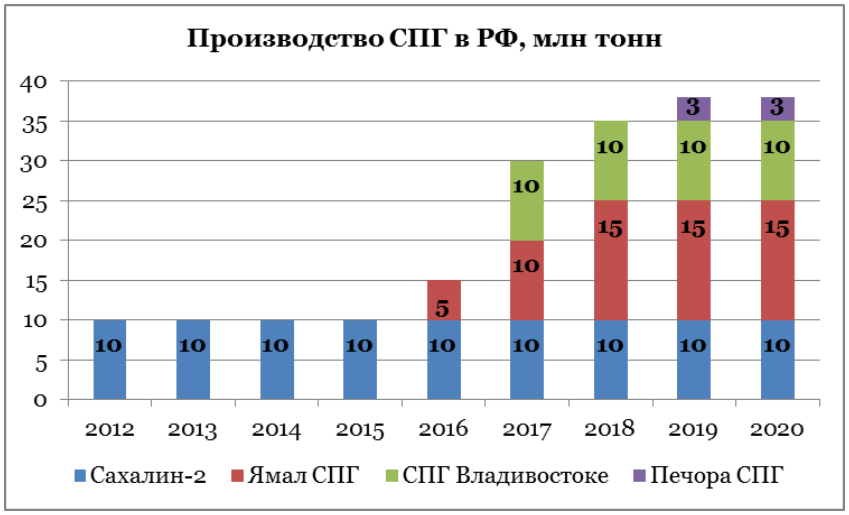


Рис. 1. График распределения производства СПГ по годам

Таблица 1

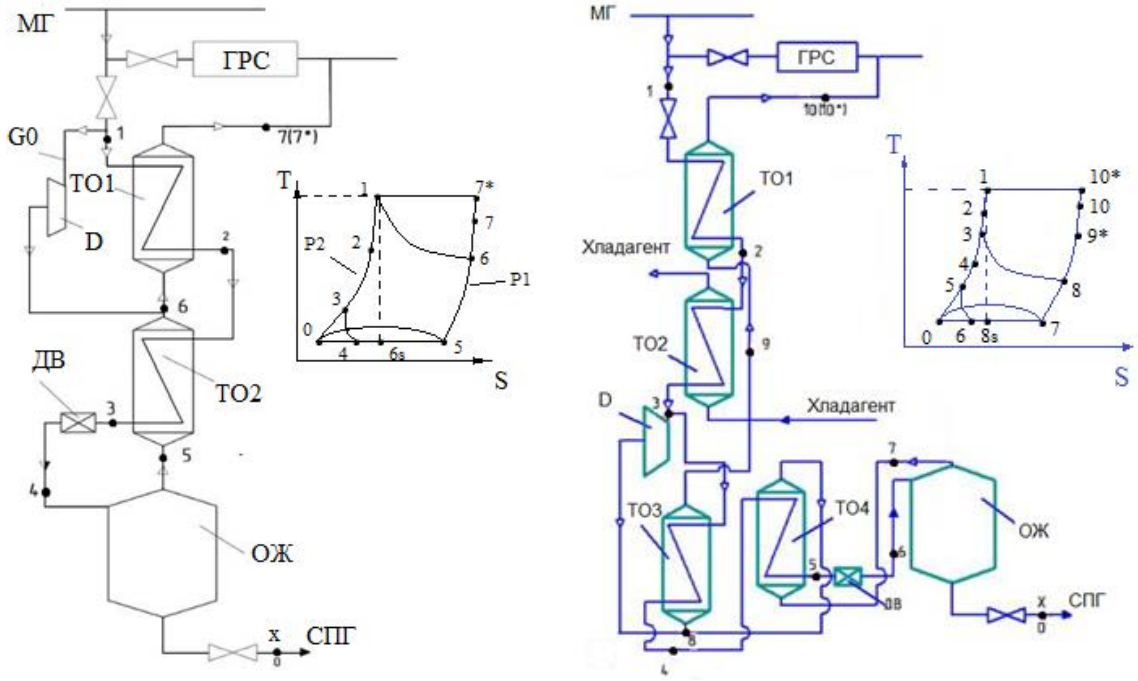
Крупнейшие СПГ–проекты в России

Проект	Год запуска	Мощность (млн. тонн)
Сахалин 2	2009	10,2
Ямал СПГ	2018	16,5
Криогаз - Высоцк	2019	0,66
Владивосток-СПГ	2020	10,0
Арктик-СПГ 2	2022	18,0
Балтийский СПГ	2023	11,5
Дальневосточный СПГ	2024	13,0

Производство СПГ на ГРС основывается на том, что газ сжижается за счет использования в детандере перепада давлений между магистральным и распределительным газопроводом. Данный метод существенно сокращает энергетические затраты и является весьма экономичным. Суть метода состоит в том, что на ГРС производится ПГ, который затем автотранспортом в криогенных цистернах отправляется потребителю и переливается в криогенные резервуары. После этого газ заправляется в жидком состоянии в криогенные бортовые системы или регазифицируется и поступает в котельные в качестве топлива [1].

Руководствуясь наиболее рекомендуемыми циклами для работы ожижителя ПГ на ГРС, для анализа выбираются детандерный цикл среднего давления ожижения метана с расширением в детандере части неохлажденного газа и детандерный цикл среднего давления ожижения метана с расширением в детандере части охлаждённого газа, изображенные на рис. 2.

В обоих циклах метан подается уже в сжатом виде из магистрального трубопровода МГ в двухступенчатую криогенную установку, после чего в цикле 1 неохлаждённая часть метана подаётся в детандер, где расширяется с совершением работы и направляется дальше в теплообменник ТО2, а другая часть газа проходит последовательно через теплообменники ТО1 и ТО2, где также охлаждается. В цикле 2 процесс проходит другим образом. Здесь метан сначала охлаждается в теплообменниках ТО1 и ТО2, и только потом часть охлаждённого газа подаётся на детандер, а другая его часть отправляется в теплообменник ТО3, и затем весь метан проходит еще одно охлаждение в теплообменнике ТО4. В обоих циклах метан, пройдя через все стадии охлаждения, дросселируется в дросселе ДВ до давления обратного потока, и в окончательном виде поступает в отделитель жидкости ОЖ, где сконденсированная часть метана сливается в сборник СПГ, а несконденсированная проходит по обратному циклу, впоследствии смешиваясь с частью газа, поступающей из детандера [2].



а б

Рис. 2. Блок схема детандерного цикла среднего давления ожижения метана:
(а) – с расширением в детандере неохлажденного газа;
(б) – с расширением в детандере охлажденного газа

Сравнение и термодинамический расчёт детандерных циклов среднего давления ожижения метана с расширением в детандере части неохлажденного и охлаждённого газа

Для выбора подходящего криогенного цикла, по которому будет работать ожижитель ПГ необходимо сначала провести термодинамический расчёт каждого выбранного цикла, после чего на основании результатов выбрать цикл с максимальным коэффициентом ожижения, который может произвести цикл на ГРС.

Все теплофизические параметры, использующиеся для расчёта и рекомендуемые для функционирования ожижителя ПГ на ГРС, представлены в таб. 2 для цикла с расширением части неохлаждённого газа (цикл 1) и в таб. 3 для цикла с расширением части охлаждённого газа (цикл 2) [3]:

Таблица 2

Исходные данные для цикла 1

P, МПа	*T*, К	*i*, кДж/кг	Номер точки в цикле
0,6	210	997	6
4	211	919	2
0,6	285	1141	7
4	300	1160	1
0,6	–	268	0
0,6	185	941,5	1_s

Таблица 3

Исходные данные для цикла 2

P, МПА	*T*, К	*i*, кДж/кг	Номер точки в цикле
4	300	1162	1
4	280	1110	2
4	203	922	3
0,6	171	910	6_s
0,6	193	959	7
0,6	285	1160	9
0,6	–	267	0

Также необходимо зафиксировать определённые ограничения и требования к исходным данным, относящиеся к обоим циклам:

– P_1 и P_2 являются соответственно давлением газа, идущего из магистрали, и давлением газа, попадающего в магистраль по обратному циклу;

– потери в окружающую среду (ОС) для первой ступени и для второй ступени будут составлять соответственно $q_1 = 4$ кДж/кг и $q_2 = 2$ кДж/кг;

– изоэнтропный коэффициент полезного действия для детандера будет составлять $\eta_{ад} = 0{,}75$;

– все необходимые значения энтальпий *i* берутся из справочника [4].

Далее, используя энергетические балансы первой и второй ступеней, составляется система уравнений, в которую входят значения энтальпий *i* и теплопритоки в ОС $q_1 q_1$ и $q_2 q_2$. Из неё необходимо определить долю детандерного потока и коэффициент ожижения *x*.

1. Расчёт для цикла с расширением части неохлаждённого газа:

$$G_D = \frac{(i_6 - i_2) - (i_7 - i_1) + x \cdot (i_7 - i_6) + q_1}{(i_1 - i_6) + (i_6 - i_2)},$$

$$x = \frac{(1 - G_D) \cdot (i_6 - i_2) - q_2}{(i_6 - i_0)},$$

или в цифрах:

$$G_D = \frac{(997 - 919) - (1141 - 1160) + x \cdot (1141 - 997) + 4}{(1160 - 997) + (997 - 919)},$$

$$x = \frac{(1 - G_D) \cdot (997 - 919) - 2}{(997 - 268)}.$$

Исходя из данной системы уравнений, можно определить, что G_D = 44,1% и x = 6,17%.

2. Расчёт для цикла с расширением части охлаждённого газа:

$$G_D = \frac{(i_7 - i_3) - (i_9 - i_1) + x \cdot (i_9 - i_7) + q_1}{(i_2 - i_7) + (i_7 - i_3)},$$

$$x = \frac{(1 - G_D) \cdot (i_7 - i_3) - q_2}{(i_7 - i_0)},$$

или в цифрах:

$$G_D = \frac{(959 - 922) - (1160 - 1162) + x \cdot (1160 - 959) + 4}{(1110 - 959) + (959 - 922)},$$

$$x = \frac{(1 - G_D) \cdot (959 - 922) - 2}{(959 - 267)}.$$

Решая систему уравнений, получаем следующие результаты: G_D = 25%, x = 2,9%.

Выводы

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что:

1. Доля детандерного потока в цикле с расширением в детандере части неохлаждённого газа достигает большей величины 44.1 %, что уже делает данный цикл наиболее привлекательным в силу того, что холодопроизводительность детандера прямо пропорциональна количеству газа, которое подаётся на детандер.
2. Коэффициент ожижения в детандерном цикле с расширением в детандере части неохлаждённого газа приблизительно выше, чем в цикле с расширением части охлаждённого газа на 3 %, что указывает на то, что цикл 1 способен обеспечить большую долю сжиженного газа от общего объёма, чем цикл 2.
3. Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что рекомендуемым циклом для оптимальной и продуктивной работы ожижителя ПГ является цикл среднего давления ожижения метана с расширением в детандере части неохлажденного газа.

Литература

1. Артемьев Д.В. Выбор оптимального режима ожижителя природного газа: Выпускная Квалификационная Работа. СПб.: Университет ИТМО. 2020. 50 с.
2. Акулов Л.А. Установки и системы низкотемпературной техники. Ожижение природного газа, утилизация холода сжиженного природного газа при его реагазификации: Учеб. Пособие. СПб.: СПбГУНиПТ. 2006. 175 с.
3. Архаров А.М. и др. К анализу существующих установок ожижения природного газа малой производительности // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 7. С. 24–35.
4. Акулов Л.А. и др. Теплофизические свойства криопродуктов: Учебное пособие для вузов. СПб: Политехника. 2001. 243 с.

Корженевский Юрий Глебович, автор
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы № V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика, образовательная программа «Физика наноструктур 2016»,
e-mail: iuriikorzhenevskii@yandex.ru
Литвин Александр Петрович, научный руководитель
Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
к.ф.-м.н., в.н.с. ЦИОТ, ИТМО; в.н.с. ЛКПиИ;
e-mail: litvin88@gmail.com

УДК 620.3

ТРОЙНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, ПОЛИМЕРОВ И ФУЛЛЕРЕНОВ

Ю.Г. Корженевский
Научный руководитель – к.ф.-м.н. А.П. Литвин

Аннотация
Проведено исследование трехкомпонентных гибридных фотовольтаических систем на основе квантовых точек (КТ), полимера и фуллерена. Исследовано влияние лигандной оболочки на морфологию тонких пленок, разделение и транспорт носителей зарядов, плотность ловушечных состояний. Показано, что введение фуллерена в систему полимер/КТ приводит к улучшенному транспорту носителей заряда и повышению эффективности фотовольтаического элемента. Исследование внедрение плазмонных наноструктур в дырочно-транспортный слой фотовольтаического элемента. Показано, что добавление золотых наностержней в слой PEDOT: PSS позволяет повысить эффективность преобразования солнечной энергии.
Ключевые слова
Квантовые точки, сульфид свинца, фотовольтаика, фуллерен, плазмонные наночастицы, золотые наностержни, транспорт носителей зарядов.

Введение

Главным структурным элементом солнечной энергетики выступает солнечный элемент (СЭ). Солнечные элементы соединяются в массивы, а совокупность массивов представляет собой солнечную электростанцию.

Одним из перспективных материалов для создания СЭ являются наноструктуры, так как по стоимости изготовления, удобству использования и многим другим параметрам СЭ на основе наноструктур превосходят традиционные солнечные батареи, изготавливаемые из объёмных полупроводников.

Стандартный органический гибридный солнечный элемент состоит из проводящего полимера p-типа, используемого в качестве проводящей среды для дырок, и производных фуллерена, которые служат в качестве среды для электронов. Данная схема высокоэффективна и подходит для производства солнечных элементов в больших масштабах. Однако акцепторы на основе фуллеренов имеют ряд недостатков:

высокая цена, низкая поглощательная способность и склонность к агрегации. Было показано, что полупроводниковые наноструктуры могут служить в качестве акцепторов для электронов в гибридных фотовольтаических устройствах. Благодаря разработке различных протоколов по замене лигандов в жидкой фазе гибридная фотовольтаика на основе полупроводниковых наноструктур пережила возрождение. Данный способ замены лигандов позволяет заменять длинные электрически изолирующие молекулы вокруг квантовых точек (КТ) без повреждения активного слоя будущего солнечного элемента. Сульфид свинца (PbS) – это наиболее подходящий материал для фотовольтаических устройств с КТ, так как нанокристаллы PbS обладают большой поглощательной способностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Процедуры по замене лигандов в жидкой фазе открывают возможность точного контроля над физическими и химическими свойствами КТ PbS, что позволяет создавать высокоэффективные солнечные элементы на их основе.

Концепция трёхкомпонентных гибридных солнечных элементов была разработана в целях увеличения поглощательной способности активного слоя. Она предполагает введение в активный слой небольшого количества полупроводниковых нанокристаллов. В частности, было показано, что добавление 1-4 весовых процентов КТ CdSe в активный слой органических СЭ заметно увеличивало эффективность преобразования энергии (power conversion efficiency, PCE) таких устройств. В том случае, когда СЭ построен на основе системы полимер/КТ, в качестве третьей компоненты обычно выступают, наоборот, углеродные наноматериалы, способные улучшить транспорт носителей заряда. В данной работе было проанализировано влияние введения фуллерена ($PC_{70}BM$) в гибридные солнечные элементы на основе PbS. Продемонстрировано, что точный контроль над концентрацией PCBM в активном слое позволяет достигать вдвое большей PCE, чем в контрольном образце, состоящим из КТ PbS и полимера полное название (P3HT).

На сегодняшний день также широко исследуется внедрение наноструктур во вспомогательные слои СЭ, необходимые для экстракции и транспорта носителей зарядов. Металлические наночастицы из благородных металлов, для которых наблюдается эффект локализованного поверхностного плазмонного резонанса, представляют практическую ценность для использования в СЭ. Существует несколько механизмов увеличения эффективности СЭ путём внедрения в них металлических плазмонных наночастиц: в активном слое СЭ действие ближнего поля наночастиц усиливает поглощение падающего света, а также рассеивает его, увеличивая оптический путь, что дополнительно увеличивает вероятность поглощения света [1]. Более того, транспортные слои СЭ также могут быть улучшены благодаря металлическим наночастицам: они увеличивают их проводимость и модифицируют морфологию поверхности так, что улучшается эффективность всего СЭ. Таким образом, металлические наночастицы могут помещаться сразу в нескольких слоях СЭ, что даёт суммарный эффект благодаря разным физическим процессам.

Внедрение золотых наностержней в дырочно-транспортные слои PEDOT:PSS

Несмотря на успехи, достигнутые при оптимизации дырочно-транспортных слоев на основе PEDOT:PSS в органических СЭ за счет внедрения плазмонных наночастиц, крайне мало внимания уделялось применению данной стратегии для увеличения эффективности СЭ на основе КТ и полимеров. В настоящей работе рассмотрено внедрение золотых наностержней в дырочно-транспортный слой на основе PEDOT:PSS для их применения в СЭ на основе КТ PbS и конъюгированного полимера (P3HT): рассмотрены различные конфигурации внедрения, исследована морфология дырочно-транспортных слоев, их электрические свойства, определена оптимальная концентрация добавки золотых наностержней, изготовлены соответствующие СЭ.

Для исследования изменения морфологии поверхности PEDOT:PSS при внедрении наностержней была изготовлена линейка образцов с варьируемой долей исследуемого вещества, как показано в таблице.

Таблица

Параметры функционализированных плёнок

Объёмная добавка, %	Толщина плёнки, нм	Проводимость, См/м
0	40 ± 2	4600 ± 1800
0,25	40 ± 2	4900 ± 1000
2	30 ± 2,3	13300 ± 5400
10	30 ± 2,5	25700 ± 5600

Благодаря снимкам с атомно-силового микроскопа было показано наличие однородных плёнок с присутствующими агрегатами, которые увеличиваются при увеличении содержания золота.

Полученные значения удельной электрической проводимости также приведены в Таблице. На основе полученных данных была подобрана оптимальная концентрация наностержней для внедрения в дырочно-транспортный слой СЭ. При концентрации золотых наностержней в 2 % значительно улучшаются электрические параметры слоя, при этом не нарушается его морфология. Влияние функционализации транспортного слоя PEDOT:PSS на работу фотовольтаических устройств было исследовано на серии опытных солнечных элементов, изготовленных по различным архитектурам: (1) – референтный образец; (2) – золотые наностержни в дырочно-транспортном слое PEDOT:PSS; (3) – золотые наностержни в дырочно-транспортном слое PEDOT:PSS покрыты дополнительным транспортным слоем чистого PEDOT:PSS

При характеризации данных устройств были получены вольтамперные характеристики (ВАХ), из которых видно, что наибольшей эффективностью преобразования энергии обладает образец 2, в котором присутствует дополнительный транспортный слой чистого PEDOT:PSS между активным слоем и слоем, обогащённым золотыми наностержнями. Результирующая эффективность солнечного элемента составила 0,64%.

Исследование солнечных элементов на основе КТ и полимера показало, что введение модифицированного при помощи наностержней дырочно-транспортного слоя позволяет повысить эффективность преобразования солнечной энергии.

Влияние замены лигандной оболочки на оптические свойства и морфологию гибридных плёнок

После проведения коллоидного синтеза КТ PbS имеют на своей поверхности в качестве стабилизатора длинные молекулы олеиновой кислоты (oleic acid, OA), благодаря им удаётся избежать агрегации КТ, а также каких-либо повреждений их поверхности. Однако для применения КТ в оптоэлектронных устройствах требуется дополнительный контроль за стабилизатором, пассивирующим КТ, потому что как морфология тонких плёнок, так и их оптические свойства зависят от типа лигандов и покрытия ими поверхности КТ. Длина молекулы олеиновой кислоты (~ 1,8 нм), определяющая минимальное расстояние между плотно упакованными КТ, делает толщину изолирующего слоя стабилизатора слишком большой для успешного транспорта носителей заряда между КТ и другими компонентами в активном слое солнечной ячейки.

В целях улучшения переноса заряда в смесях полимер/КТ были разработаны процедуры удаления/замены лигандов. Замена лигандов может быть проведена как в

жидкой фазе, с использованием, например, йодида свинца (PbI_2) [2] или йодида метиламмония в случае йодидной пассивации, так и после нанесения плёнки (замена стабилизатора в сухой фазе), с использованием уксусной кислоты, 1,4-бензолдитиола, 1,2-этандитиола, 1,3-меркаптопропионовой кислоты, или йодид тетрабутиламмония [3, 4].

Наиболее широко применяемая процедура – это замена стабилизатора после создания активного слоя, но у этого способа есть серьёзный недостаток – потенциальное изменение морфологии активного слоя. Для решения этой проблемы в последние годы было разработано несколько способов замены стабилизатора в жидкой фазе [5]. Для дальнейшего развития гибридной фотовольтаики необходим тщательный контроль за морфологией активного слоя и его оптическими свойствами после процедур по замене стабилизатора.

Чтобы улучшить процесс переноса заряда у КТ PbS для активного слоя в фотовольтаических элементах был заменён стабилизатор на более короткие молекулы йода. Чтобы произвести непосредственно замену стабилизатора КТ PbS были обработаны раствором PbI_2 в смеси диметилформамида и метанола [2].

Для сравнения качества поверхности, которую образуют смеси проводящего полимера P3HT с КТ сульфида свинца с различным стабилизатором, было проведено исследование данных поверхностей методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). На рис. 1(a) показана поверхность образца со смесью полимера и КТ со стабилизатором в виде ОА. Видно, что данная смесь образует большое количество агрегатов, между которыми находится пустое пространство, наличие этих пустот препятствует разделению зарядов, а следовательно, снижает эффективность активного слоя. Шероховатость поверхности данного образца составляет 11,5 нм. На рис. 1(b) показан АСМ снимок смеси полимера и КТ, лиганды которых были заменены на молекулы йода. В данном случае поверхность является гладкой с небольшим количеством разрывов и пустот. Видно, что такая замена лигандов приводит к меньшему количеству агрегатов в плёнке и более высокой ее однородности, шероховатость составила 1,7 нм.

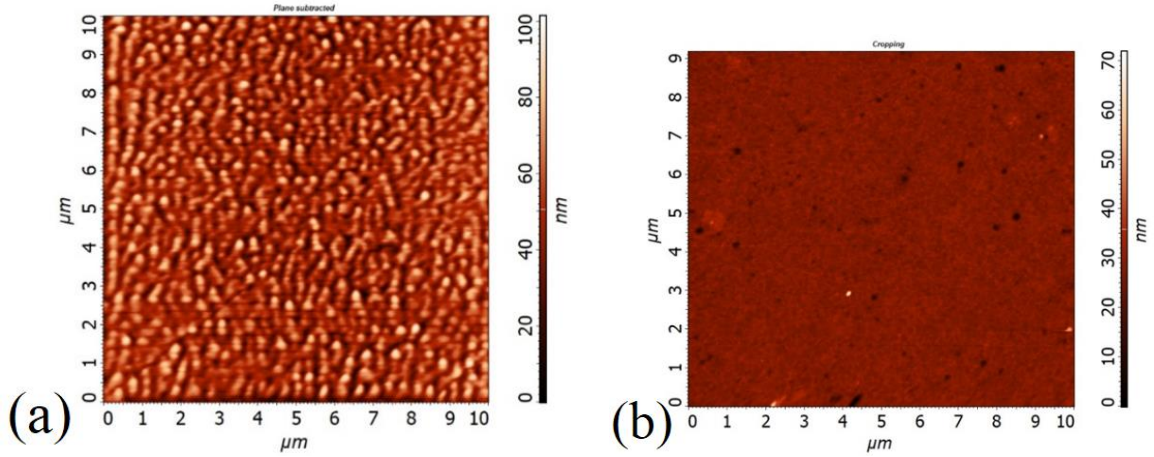


Рис. 1. (a) поверхность образца P3HT/PbS-OA (b) поверхность образца P3HT/PbS-I

Для оценки эффективности тушения фотолюминесценции были приготовлены два опорных образца: смесь КТ PbS-OA и PbS-I с изолирующим полимером PMMA. Время затухания для смеси P3HT/PbS-OA мало отличается от времени затухания соответствующего контрольного образца КТ с изолирующим полимером, что свидетельствует о малоэффективном переносе дырок с КТ на полимер, она не превышает 20%. В то же время смесь P3HT/PbS-I показывает сильное тушение люминесценции. Соотношение времён затухания соответствует эффективности

переноса дырок 94%.

Добавление аллотропных модификаций углерода может улучшать транспорт электронов с КТ к соответствующему транспортному слою. Для проверки данного предположения был проведён ряд исследований трёхкомпонентных структур из вышеупомянутых полимера P3HT, КТ PbS и фуллерена PCBM.

Были сняты спектры фотолюминесценции КТ PbS-I (контрольный образец), смеси PbS-I/P3HT и смеси PbS-I/PCBM, при этом были использованы КТ диаметром 3,9 нм. Измерения спектров фотолюминесценции проводились в инфракрасном диапазоне. Наиболее эффективное тушение люминесценции наблюдается для двойной смеси PbS-I/P3HT, в то время как в двойной смеси PbS-I/PCBM интенсивность люминесценции усиливается по сравнению с референтным образцом. Это свидетельствует о том, что между КТ и фуллереном происходит безызлучательный перенос энергии, поскольку спектр люминесценции фуллерена лежит в области поглощения КТ.

Для подтверждения данной гипотезы необходимо определить абсолютные энергетические положения потолка валентной зоны и дна зоны проводимости полимера P3HT, фуллерена PCBM и двух видов КТ PbS. Было установлено, что положение дна зоны проводимости для КТ диаметром 3,9 нм и фуллерена почти совпадает, что делает безызлучательный перенос энергии более эффективным, чем разделение и перенос заряда между PbS и PCBM, поэтому в трёхкомпонентных смесях предлагается использовать 2,8 нм КТ PbS для предотвращения безызлучательного переноса энергии. Было обнаружено, что при использовании 2,8 нм КТ наблюдается значительное тушение их фотолюминесценции в смесях с полимером и фуллереном, при этом наиболее эффективное затухание наблюдается в трёхкомпонентной смеси.

Солнечные элементы на основе трёхкомпонентных гибридных систем

Полимер P3HT и КТ PbS формируют эффективную донорно-акцепторную пару для использования в гибридных фотовольтаических устройствах. После поглощения света полимером и КТ происходит разделение экситонов на поверхности соприкосновения, полимер и КТ отвечают за перенос дырок и электронов, соответственно. Для приготовления активного слоя солнечных элементов были изготовлены чернила, состоящие из смеси PbS-I и P3HT в массовом соотношении 9/1, соответственно. В данную смесь было добавлено небольшое количество бутиламина для компенсации его недостатка и предотвращения образования агрегатов в смеси. Активный слой был расположен между электрон-транспортным и дырочно-транспортными слоями и электродами, как показано на рис. 2(a).

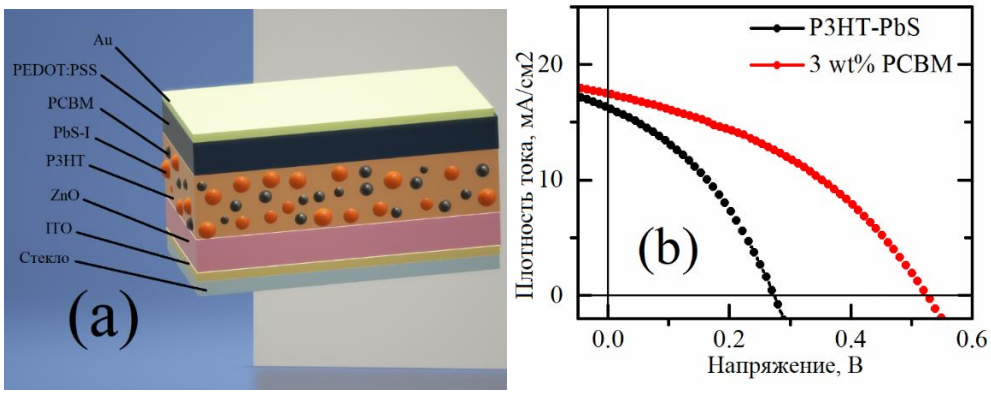


Рис. 2. (a) Послойная структура СЭ (b) ВАХ лучшего образца (красная линия) и опорного образца (чёрная линия)

ВАХ, полученная для двухкомпонентного P3HT/PbS-I образца показана на рис.

2(b) чёрной линией. Видно, что напряжение холостого хода не превышает 0,3 В, это подтверждает факт того, что процесс разделения заряда неэффективен в двойной смеси P3HT/PbS-I. Введение производных фуллерена может привести к улучшению эффективности подобных гибридных устройств. Чтобы проверить данную гипотезу, были приготовлены тройные смеси P3HT/PbS-I/PCBM с различным содержанием фуллерена. Для формирования требуемого раствора в двойную смесь P3HT/PbS-I были добавлены 1%, 3% и 5% весовых процентов фуллерена. Каждый раствор был размешан на протяжении не менее 20 мин, после чего был помещён в ультразвуковую ванну до непосредственного нанесения. Ясно видно, что ток короткого замыкания увеличивается с концентрацией PCBM вследствие улучшения переноса заряда. При добавлении большого количества фуллерена наблюдается снижение напряжения холостого хода (open circuit voltage, V_{oc}), что может быть обусловлено образованием агрегатов PCBM. Нахождение оптимальной концентрации PCBM позволяет достичь максимальной эффективности солнечных элементов. Введение 3% PCBM в устройство увеличивает ток короткого замыкания (short circuit current, I_{sc}) и V_{oc} вследствие улучшения разделения и переноса заряда. В результате достигается вдвое большая PCE.

Заключение

В процессе работы были исследованы дырочно-транспортные слои СЭ и их модификация, внедрение плазмонных золотых наночастиц позволило повысить их проводимость, и, как следствие, эффективность СЭ, в которых они используются. Было исследовано влияние замены оболочки КТ на морфологию и оптические свойства гибридных плёнок, что позволило повысить эффективность переноса заряда в донорно-акцепторной системе при сохранении высокого качества морфологии пленок. Было установлено, что введение производной фуллерена в смесь полимера и КТ позволяет достичь более эффективного разделения и транспорта носителей заряда. Были созданы опытные образцы трёхкомпонентных СЭ, определено оптимальное соотношение компонентов активного слоя, проанализированы вольт-амперные характеристики, определены ключевые фотовольтаические параметры.

Литература

1. Chen S. et al. Broadband enhancement of PbS quantum dot solar cells by the synergistic effect of plasmonic gold nanobipyramids and nanospheres //Advanced Energy Materials. 2018. Т. 8. №. 8. С. 1701194.
2. Lu H. et al. Iodide-Passivated Colloidal PbS Nanocrystals Leading to Highly Efficient Polymer:Nanocrystal Hybrid Solar Cells // Chem. Mater. 2016. Т. 28, № 6. С. 1897–1906.
3. Chen Z. et al. Recent development and understanding of polymer-nanocrystal hybrid solar cells // Mater. Chem. Front. 2017. Т. 1, № 8. С. 1502–1513.
4. Colbert A.E. et al. Effects of Ligands on Charge Generation and Recombination in Hybrid Polymer/Quantum Dot Solar Cells // J. Phys. Chem. C. 2015. Т. 119. № 44. С. 24733–24739.
5. Wang R. et al. Colloidal quantum dot ligand engineering for high performance solar cells // Energy Environ. Sci. Royal Society of Chemistry, 2016. Т. 9. № 4. С. 1130–1143.

Михтанюк Софья Егоровна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы №B3466,
направление подготовки: 19.03.01 – Биотехнология,
e-mail: mikhtanyuk@mail.ru
Неелов Игорь Михайлович
Год рождения: 1952
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
д.ф.-м.н., профессор,
e-mail: i.neelov@mail.ru

УДК 541.64

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗВЕТВЛЁННЫХ ЛИЗИНОВЫХ МОЛЕКУЛ С ПЕПТИДАМИ GED И AED МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

С.Е. Михтанюк
Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор И.М. Неелов

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №2019-03-00715 «Теоретическое и экспериментальное исследование дендримерных наноконтейнеров».

Аннотация
С помощью компьютерного моделирования методом молекулярной динамики была изучена возможность образования комплекса лизиновых дендримеров и дендриграфтов с терапевтическими пептидами GED и AED. Было получено, что молекулы обоих типов пептидов образуют стабильные комплексы с лизиновыми дендримерами и дендриграфтами. Также были изучены структура и конформационные свойства этих комплексов. Было показано, что образование комплексов происходит в основном за счет электростатических взаимодействий между противоположно заряженными молекулами дендримера или дендриграфта и пептидов AED и GED. Такие комплексы могут быть использованы в будущем для доставки этих или аналогичных пептидов в целевые клетки.
Ключевые слова
Лизиновый дендример, лизиновый дендриграфт, регуляторные пептиды, компьютерное моделирование, метод молекулярной динамики.

Введение

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений в биомедицине является разработка систем адресной доставки лекарств [1]. К таким системам относятся, в частности, полимерные наночастицы, мицеллы, липосомы, полимерсомы, дендримеры и дендриграфты и другие. Дендримеры представляют собой наноразмерные разветвленные макромолекулы, ветвящиеся из единого центра, а дендриграфты имеют несколько центров ветвления в ядре [2-3]. Они богаты аминогруппами и могут образовывать комплексы с противоположно заряженными молекулами, например, ДНК, полисахаридами и пептидами. Поэтому они широко использующиеся для доставки лекарственных препаратов и генетического материала.

Водородные связи и гидрофобные взаимодействия также играют важную роль в формировании таких комплексов.

Короткие пептиды (до 10-20 аминокислот) регулируют жизненно важные функции организма. В частности, они являются сигнальными молекулами, участвующими в механизмах регуляции гомеостаза при старении.

В данной работе будут изучены комплексы, состоящие из лизиновых дендримеров и дендриграфтов второго поколения и геропротекторных пептидов AED (Ala-Glu-Asp) и предположительно стрессопротекторных пептидов GED (Gly-Glu-Asp). Выбранные пептидные носители должны будут защищать регуляторные пептиды от воздействия среды ЖКТ.

Цели и задачи работы

Целью данной работы является демонстрация возможности образования комплексов лизиновых дендримеров и дендриграфтов с лекарственными пептидами GED и AED с помощью проведения численных расчетов на основе метода молекулярной динамики.

Задачи, решаемые в процессе выполнения работы:

1. Приготовление начальных конформаций исследуемых молекул (дендримера или дендриграфта с лекарственными пептидами) в водном растворе с помощью молекулярного редактора AVOGADRO.
2. Численный расчет временных траекторий исследуемых систем с помощью методов молекулярной динамики.
3. Получение мгновенных снимков исследуемых молекул, доказывающих образование комплексов.
4. Расчет и построение графиков функций (размеров, числа водородных связей, распределения плотности и других) в процессе образования комплексов дендримеров или дендриграфтов с рассмотренными лекарственными пептидами.
5. Вычисление характеристик образовавшихся комплексов.

Основная часть

Материалы и методы

Макромолекулы дендримера и дендриграфта были построены в программе HyperChem5. Начальные конформации для систем были заданы с помощью молекулярного редактора Avogadro. Полученные структуры оптимизировали в ваккуме методом молекулярной механики. Дальнейшее моделирование всех систем проводилось с помощью программного пакета GROMACS 4.5.6 [4] и одного из самых современных силовых полей - AMBER99SBildn [5].

Моделирование проводилось в кубической ячейке размером $9\times9\times9$ нм^3 с периодическими граничными условиями, где система, состоящая из дендримера или дендриграфта и пептидов, растворялась в молекулах воды и контрионах Cl^- и Na^+ для компенсации избыточного положительного заряда дендримера и отрицательного заряда пептидов. Все моделирования проводились в NPT ансамбле при нормальных условиях (температура 300 К и давление 1 атм).

Метод молекулярной динамики (МД) широко используется для моделирования различных полимерных и биополимерных систем. В этом методе для представления молекул используются механические модели, в которых атомы – шарики, а валентные связи – пружины или жесткие связи. Динамика такой механической модели реальных молекулярных систем описывается классическими уравнениями движения Ньютона, и система этих уравнений для всех шариков-атомов в системе решается численно.

Формирование комплексов

Размер подсистем, состоящих из дендримера или дендриграфта и 8 пептидов, в момент времени t оценивали по среднеквадратичному радиусу инерции Rg(t). В системе G_2+8AED в начальный момент времени значение Rg(t=0) равно 4,5 нм, оно велико, поскольку пептиды находятся далеко от дендримера. Далее в течение 30-40 нс пептиды притягиваются дендримером за счет межмолекулярных и особенно электростатических взаимодействий и размеры системы монотонно уменьшаются. По прошествии этого времени размеры обоих комплексов Rg колеблются, но их среднее значение практически не меняется со временем. Для первой системы это означает, что спустя 40 нс система приходит в состояние близкое к состоянию равновесия. Поэтому можно предположить, что через 40 нс вторая система находится в состоянии динамического равновесия.

Аналогичные временные зависимости радиусов инерции были получены для подсистем, состоящих из дендриграфта и пептидов. При этом после образования комплексов их размеры флуктуируют значительно меньше, чем размеры комплексов дендримера и пептидов, рассмотренных выше. Размеры обоих комплексов с дендриграфтами после выхода на равновесие несколько больше размеров комплексов с дендримерами.

Еще одной величиной, которая может подтвердить процесс формирования комплекса, является общее число водородных связей между дендримером и молекулами пептидов. В начале моделирования контакты между дендримером и пептидами отсутствуют, поэтому общее число водородных связей между ними равно нулю. В обеих системах с дендримерами в течение первых 30-40 нс число водородных связей монотонно растет. А затем после образования комплекса наблюдаются довольно большие флуктуации, которые могут быть связаны как с тем, что пептиды упорядочиваются на поверхности дендримера, так и с тем, что небольшая часть пептидов может отрываться от поверхности дендримера, а затем возвращаться назад.

Аналогичное поведение наблюдается для дендриграфтов, но поскольку для этих систем после образования комплексов отрывов обоих типов пептидов от поверхности дендриграфта не наблюдается, то флуктуации N(t) в этих случаях обусловлены только упорядочением пептидов на поверхности дендриграфта.

Характеристики комплексов

Для того, чтобы получить информацию о свойствах образовавшихся комплексов, были рассчитаны различные характеристики усредненные по равновесной части моделирования. В частности, были вычислены среднеквадратические значения радиусов инерции Rg комплексов и дендримеров/дендриграфтов в комплексах, они представлены в таблице.

Как видно из таблицы значения Rg для первых трех комплексов больше, чем размеры самих дендримеров и дендриграфтов в этих комплексах. В комплексе DG2+8GED, наоборот, размеры дендриграфта больше размеров комплекса, следовательно пептиды проникают во внутреннюю часть дендриграфта, «выталкивая» его атомы на периферию. Размеры комплексов G2+8AED и DG2+8AED несколько больше соответствующих размеров комплексов с 8 пептидами GED. Это позволяет сделать предположение, что в первой и третьей системе пептиды лучше проникают в поверхностный слой дендримера. Форма комплексов и дендримеров в комплексах может быть охарактеризована соотношением основных компонент тензора инерции Rg^{11}, Rg^{22}, Rg^{33}. Грубая оценка анизотропии формы была произведена с помощью отношения наибольших и наименьших собственных значений тензора инерции различных подсистем Rg^{33}/Rg^{11}. Это отношение для дендриграфта в третьем комплексе равно 1,39, а в четвертом - 1,29, следовательно пептиды GED, проникая внутрь

дендриграфта, придают ему более сферическую форму.

Таблица

Среднеквадратические радиусы инерции R_g, их компоненты R_g^{11}, R_g^{22}, R_g^{33} и анизотропия комплексов R_g^{33}/R_g^{11}

№ Системы	Система	Rg, нм	Rg^{11}, нм	Rg^{22}, нм	Rg^{33}, нм	R_g^{33}/R_g^{11}
1	G_2 + 8AED	1,60	0,92	1,41	1,50	1,64
1	G_2	0,99	0,67	0,82	0,91	1,36
2	G_2 + 8GED	1,54	0,94	1,33	1,45	1,53
2	G_2	0,98	0,59	0,86	0,91	1,56
3	DG_2 +8AED	1,66	1,09	1,41	1,53	1,40
3	DG_2	1,59	1,10	1,34	1,46	1,39
4	DG_2 +8GED	1,58	1,09	1,32	1,44	1,33
4	DG_2	1,60	1,12	1,33	1,44	1,29

Функция распределения по радиусам инерции дает более подробную информацию об интервале значений Rg дендример-пептидных комплексов и дендримеров в них, в частности, об амплитуде их флуктуаций в этих системах. Из анализа кривых для дендримеров в комплексах G2+8AED и G2+8GED следует, что функция распределения для дендримера в первом комплексе имеет один выраженный пик, в то время как распределение для второго – два пика. Это может быть связано с тем, что во втором комплексе пептиды GED проникают во внутреннюю часть дендримера, разделяя его атомы. Тем ни менее диапазон значений для радиусов инерции дендримера в обоих комплексах примерно одинаков. Хвосты распределения по радиусам инерции при больших Rg в обоих комплексах длинные, что означает, что либо пептиды могут касаться дендримеров комплекса одним концом, либо, что некоторые из них могут присоединяться и отсоединяться от комплекса. При этом хвост распределения при больших Rg заметно длиннее в системе G2+8GED чем для комплекса G2+8AED. Это связано с тем, что у дендримера недостаточно большой заряд и поверхность, чтобы все пептиды могли расположиться и удерживаться на ней.

Для дендриграфтов распределения Rg комплексов с обоими пептидами намного уже и близко к распределению Rg для дендриграфта, что означает, что большинство пептидов находится либо внутри дендриграфта, либо плотно прилегают к его поверхности.

Еще одной характеристикой образовавшихся комплексов является функция распределения $p(n_H)$ числа водородных связей n_H для обеих систем. Она показывает, где находится пик данного распределения, является ли оно симметричным или асимметричным и насколько число водородных связей может флуктуировать относительно среднего значения. Было установлено, что распределения числа водородных связей для обеих систем в комплексе с дендримером достаточно симметричны, но для второй системы оно имеет более высокий пик при меньших значениях n_H. В соответствии с полученными результатами позиции пиков $p(n_H)$ близки к 18.54 и 15.6, соответственно. Интервал значений для первой системы находится в

диапазоне 7-30, в то время как для второй системы - 7-25 (т. е. в среднем по 1-3 водородной связи на пептид). Важно отметить, что для второго комплекса наблюдается более узкий пик, чем для первого, это говорит о том, что число водородных связей, которое дендример образует с пептидами GED в процессе моделирования комплекса флуктуирует меньше. Для комплексов с дендриграфтами форма распределений также симметричная, но флуктуации происходят в большем интервале (от 10 до 40 водородных связей, т. е. по 1-5 водородных связей на пептид. Это означает, что на поверхности дендриграфта пептиды чаще лежат, в то время как на дендримере они скорее стоят, зацепившись одним концом.

Информация о внутренней структуре образовавшегося комплекса была получена с помощью функции радиального распределения плотности различных групп атомов комплекса относительно центра инерции дендримера. Из этих зависимостей следует, что пептиды GED лучше проникают во внутреннюю часть дендримера, чем петиды AED.

Для комплексов с дендриграфтом наблюдается аналогичная картина, но проникновение пептидов GED не так велико, как в комплексах с дендриграфтами.

Выводы

В работе с помощью метода молекулярной динамики исследована возможность использования дендримеров и дендриграфтов второго поколения в качестве носителей молекул регуляторных пептидов AED и GED. В результате работы

– продемонстрирована возможность использования данного дендримера и данного дендриграфта в качестве носителей пептидов AED и GED,

– показано, что молекулы пептидов AED и GED образуют комплексы с молекулами дендримера второго поколения, однако небольшой заряд этого дендримера приводит к ограниченной емкости дендримера для переноса молекул этих пептидов,

– получено, что несмотря на одинаковое распределение зарядов в молекулах AED и GED пептидов их взаимодействие с дендримерами отличается, что приводит к разному радиальному распределению пептидов относительно центра дендримеров и разной емкости дендримеров для переноса этих пептидов.

– показано, что молекулы дендриграфта второго поколения образуют более устойчивые комплексы с обоими типами пептидов, что происходит как из-за большего заряда дендриграфта, так и из-за его большей площади поверхности (т. к. в отличие от дендримера заряд имеется не только на терминальных, но и на боковых группах).

– получено, что разное радиальное распределение AED и GED пептидов по отношению к центру носителя наблюдается и для дендриграфтов, однако оно менее выражено и поэтому меньше влияет на способность дендриграфтов данного поколения переносить рассмотренные пептиды по сравнению с ранее рассмотренными дендримерами.

Литература

1. Наноразмерные носители для доставки лекарственных препаратов / В.Н Постнов [и др.] // Биотехносфера. 2013. Т. 6. № 30. С. 16–27.
2. Yuefei Z. Dendrimer-Based Drug Delivery Systems for Brain Targeting / Z. Yuefei, L. Chunying, P. Zhiqing. // Biomolecules. 2019. V. 9. No. 12. https://dx.doi.org/10.3390%2Fbiom9120790.
3. Computer simulation of complex of lysine dendrigraft with molecules of therapeutic KED peptide / I. Neelov [et al.] // ITM Web of Conferences. 2019. V. 24. https://doi.org/10.1051/itmconf/20192402008.

4. Hess B. Gromacs 4: Algorithms for highly efficient, load-balanced, and scalable molecular simulation / B. Hess [et al.] // Journal of Chemical Theory and Computation. 2008. V. 4. P. 435–447.
5. Hornak V. Comparison of multiple amber force fields and development of improved protein backbone parameters / V. Hornak [et al.] // Proteins: Structure, Functions and Genetics. 2006. V. 65. P. 712–725.

Огирь Константин Сергеевич
Год рождения: 1998,
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
студент группы №К3420,
направление подготовки: 11.03.02 – Инфокоммуникационные
технологии и системы связи,
e-mail: Kostya_ogir@mail.ru
Осипов Никита Алексеевич
Год рождения: 19972,
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
к.т.н., доцент, доцент (квалификационная категория «доцент практики»),
e-mail: nikita@ifmo.spb.ru

УДК 004.584

ПРОЕКТ МОДУЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

К.С. Огирь
Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.А. Осипов

Работы была выполнена в рамках темы НИВКР №107824 3707868 «Проектирование модуля принятия решений в условиях неопределенной исходной информации».

Аннотация
В работе предлагается модель модуля принятия решений, позволяющая определять наилучшее решение в условиях неопределенной исходной информации, используя различные критерии выбора оптимального решения, вероятностные модели и методы установки начальных вероятностей, а также разработанный метод корректировки субъективных вероятностей с применением коэффициента согласованности экспертов.
Ключевые слова
Принятие решения, вероятность, неопределенность, вероятностные модели, согласованность.

Целью данной работы является проектирование модуля принятия решения для ситуаций с неопределенной информацией. Одной из главных особенностей такого модуля должна стать возможность лёгкой замены критериев выбора лучшего решения и методов анализа данных, а также в таком модуле должны быть учтены недостатки аналогичных программ и их плюсы, для конкурентоспособности разрабатываемого продукта.

Актуальность этой темы с каждым годом увеличивается, так как системы, которые принимают или помогают принимать решения в ситуациях неопределенности проникают с течением времени в большее количество сфер жизни человека, и все больше усложняются, принимая иногда формы, моделирующие рассуждения человека. Разработка систем, в которых решение принимается на основе неопределенной информации позволит минимизировать риски принятий решений при использовании подобных систем.

Системы поддержки принятия решений (далее СППР) используются лицами, принимающими решение для выбора оптимального решения, наилучшей стратегии или

нахождения наиболее вероятной причины заданного события в условиях, где на результат может влиять множество факторов. Такими факторами могут быть статистические данные о наблюдении за определенным процессом или явлением, научные законы, накопленные знания, мнения экспертов. Для систем принятия решений выделяют две основные цели:

- выявление оптимального решения;
- ранжирование решений по приоритету.

Любая система принятия решений включает в себя модуль, отвечающий за принятие решений на основе выделенной информации. Модуль принятия решений – часть системы, отвечающая за обработку предоставленной информации и определение оптимального решения или ранжирования возможных решений по их приоритетности на основе математических и логических законов. В зависимости от характера и типа системы принятия решений используются различные методы и технологии в написании такого модуля: информационный поиск, рассуждения на основе прецедентов, имитационное моделирование, генетические и эволюционные алгоритмы, нейронные сети, алгоритмы ML, Байесовские сети, теория игр и другие [1].

В качестве анализируемых решений были рассмотрены системы; СППР «Выбор», программа «Analytica», программа «Riskion», СППР от компании «Intellix». В СППР «Выбор» используется метода анализа иерархий (далее МАИ), в данном аналоге решение полностью зависит от эксперта, использующего данную программу, а также отсутствует возможность использования вероятностей, что ограничивает возможность использования системы в условиях неопределенности. Программа «Analytica» для ситуаций неопределенности использует метод моделирования Монте-Карло с применением метода латинского гиперкуба, к недостаткам такого метода относят сложность в настройке модели при множестве параметров, а также таком метод слабо применим для расчёта событий с очень высокой или низкой вероятностью [2]. Программа «Riskion» является зарубежным аналогом использующим МАИ, при использовании данной программы процесс принятие решений разделён на этапы и итеративно проходит через все этапы, основываясь на мнении экспертов, обсуждающих предложенное системой решение. Вместе с тем программа лишь улучшает и эксплуатирует метод анализа иерархий, не предлагая других альтернативных способов решения задач с неопределенной исходной информацией, а также предопределяет использование экспертного анализа для принятия решений, не оставляя пользователям альтернативных средств работы с ней. В СППР от компании «Intellix» используется запатентованная технология, использующая нейронные сети и машинное обучение. Ядром такой системы является модуль SOUL (Self-Optimising Universal Learner), позволяющий сопоставлять человеческие знания и существующие принципы решения задач в формат, подходящий для компьютерных вычислений. Особенностью разработанного, отмечаемые разработчиками, является то, что созданная пользователем модель может получать явные (эксплицитные) знания и неявные. Так же для данной программы отмечается, что ядро SOUL может приобретать и усваивать новые знания в режиме реального времени. Однако к минусам такой модели принятия решения можно отнести необходимость обучения на основе большого количества примеров и результатов для них.

На основе рассмотренных аналогов была определена проблема, необходимая для решения: недостаточная гибкость в применении существующих программ, а также отсутствие возможности расширения функционала, вследствие чего возникает ограниченность применения программ. Для решения этой проблемы необходимо разработать модуль, который можно было бы использовать в качестве библиотеки для использования уже написанных методов или определения своих собственных, но исправно работающих в разработанном модуле.

Под неопределенной информацией понимается неполнота информации для принятия решения, вызванная нецелостностью информации или не полным доступом к информации. Неопределенность информации также может вызываться ее субъективностью, т.е. в том случае, когда информация зависит от мнения, суждения, способа мышления эксперта, который предоставляет такую информацию. Субъективная вероятность – это числовая оценка веры, основанная на субъективной информации, в то, что некоторое событие получит означивание, то есть примет четко установленное состояние. Основываясь на объективной информации и вероятностях, полученных на основе ее анализа, субъективной информации и субъективной вероятности можно принимать определенные решения в условиях, где эта информация применима. Для неопределенной информации, вызванной неполнотой информации для принятия решения, можно использовать вероятности в теории игр для выбора оптимальной стратегии (оптимального решения) в условиях неопределенности.

Результат работы модуля определяется критерием, выбор которого зависит от ситуации неопределенности. При принятии решений выделают 2 типа неопределенности: полную и частичную. При полной неопределенности считается, что невозможно спрогнозировать вероятность наступления событий, в таком случае применяются такие критерии как: Вальда, Гурвица, Сэвиджа, оптимизма и пессимизма. Частичная неопределенность характеризуется возможностью установить некоторую вероятность наступления событий, в таких случаях применяются Байесовский критерий и критерий недостаточного основания Лапласа.

За основу была положена теория Байесовских игр, являющейся одной из разделов теории игр, для выбора оптимального решения на основе вероятностных предположений о существующих, но недоступных данных, то есть в случае неопределенной исходной информации с применением критерия Байеса (при проектировании модуля было решено предоставить пользователю выбор критерия). В общем виде Байесовская игра представляется в следующей форме [3]:

$$G = (N, \{S_i\}_{i \in N}, \{T_i\}_{i \in N}, \{\phi_i\}_{i \in N}, \{\mu_i\}_{i \in N}),$$

где:

N – множество всех игроков Байесовской игры.

S_i – множество возможных вариантов поведения i-ого игрока (его стратегий поведения).

T_i – множество типов i-ого игрока (свойство игрока, о котором может знать только сам игрок, другие игроки об это свойстве могут только высказывать предположения, вероятность этого события).

ϕ_i – функция, описывающая успешность выбранной стратегии на основе знаний игрока.

μ_i – предположения i-ого игрока о типах других игроков, критерий Байеса для ситуации кода игрок i имеет тип $t_i \in T_i$, игрок 1 имеет тип $t_1 \in T_1$ и далее до игрока n.

Таким образом, при помощи Байесовских игр решается проблема в принятии решения при наличии общего знания в области решения вопроса, а также неопределенной информации, для которой возможно лишь выставлять вероятностные оценки.

Также было замечено, что часть анализируемых программ используют мнения экспертов, т.к. такая информация является субъективной, она приводит к неопределенности при принятии решений. Поэтому была выдвинута идея, о том, что для субъективной информации, необходима корректировка. Был разработан и реализован алгоритм, в котором для определения скорректированных значений вероятностей на основе мнений нескольких экспертов, значения, предоставленные экспертами, ранжируются, после чего рассчитывается коэффициент согласованности

экспертов, которым является дисперсионный коэффициент конкордации [4], показывающий степень согласованности экспертов при выдвижении своих предположений, и рассчитанный коэффициент корректирует значение матожидания вероятностей, предложенных экспертами, для события. При высоком значении коэффициента конкордации можно говорить, что значения экспертов согласованы и для каждого из событий можно взять вероятность как математическое ожидание всех вероятностей для указанного события. Для этого была разработана функция вида:

$$p_{j_{\text{кор}}} = \frac{1}{j}\sum_i p_{i,j} + (1-k) * \frac{1-\sum_i p_{i,j}}{j}, j = 1..m,$$

где i – номер эксперта, j – номер возможного состояния, m – количество состояний, $p_{i,j}$ – вероятность состояния j указанная экспертом i, k – коэффициент конкордации.

В зависимости от коэффициента конкордации значения вероятностей корректируются, для наглядной демонстрации ниже на рис. 1 приведены графики вероятностей для восьми состояний, соединённых линиями между точками на координатной плоскости с различными значениями коэффициента согласованности k:

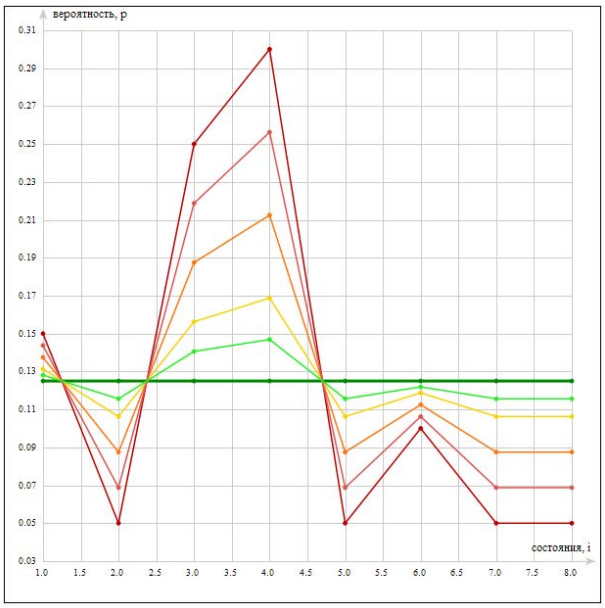


Рис. 1. Графики вероятностного распределения 8 состояний некоторого объекта, где - коэффициент k = 1; - коэффициент k = 0.75; - коэффициент k = 0.5; - коэффициент k = 0.25; - коэффициент k = 0.125; - коэффициент k = 0.

Разрабатываемый модуль должен обеспечивать гибкость работы с ним, т.е. возможность настройки всех возможных параметров, на основе этих требований была предложена структура модуля (рис. 2), исключая компонент пользовательского интерфейса, не имеющего отношения к самому модулю было выявлено 3 основных составных компонента:

1. Компонент для расчёта вероятностей различных состояний природы. Предполагается использовать Байесовские сети доверия, однако было выдвинуто предположение, что в некоторых случаях могут применяться модели для вычисления вероятностей (модель линейной регрессии, Байесовский наивный классификатор, марковские цепи и др.) или обученные нейросети. То есть данный компонент может представлять различные по структуре и способу анализа сущности, поэтому более правильно использовать место конкретной реализации способа интерфейс,

позволяющий использовать различные методы, не изменяя основной код программы, а только дополняя необходимыми методами.

2. Компонент для расчёта вероятностей типов каждого из игроков. Наряду с предложенным в этой работе методом, для каждого из игроков можно использовать различные способы нахождения таких вероятностей, например метод Монте-Карло, установка известных статистических значений или другие. Также как и с модулем расчета вероятностей различных состояний природы лучше будет использовать уникальный для всех интерфейс, который бы возвращал для списка из n типов игрока список вероятностей, полученный методом, реализующим этот интерфейс.

3. Компонент расчёта успешности выбора стратегии игрока. В условиях частичной неопределенности, когда предполагаются вероятности для типов других игроков, выдвигается критерий Байеса, однако при доработке существующих критериев или разработке новых, интеграция таких была бы предпочтительной. Исходя из выдвинутых предложений реализация критериев так же будет происходить через интерфейс.

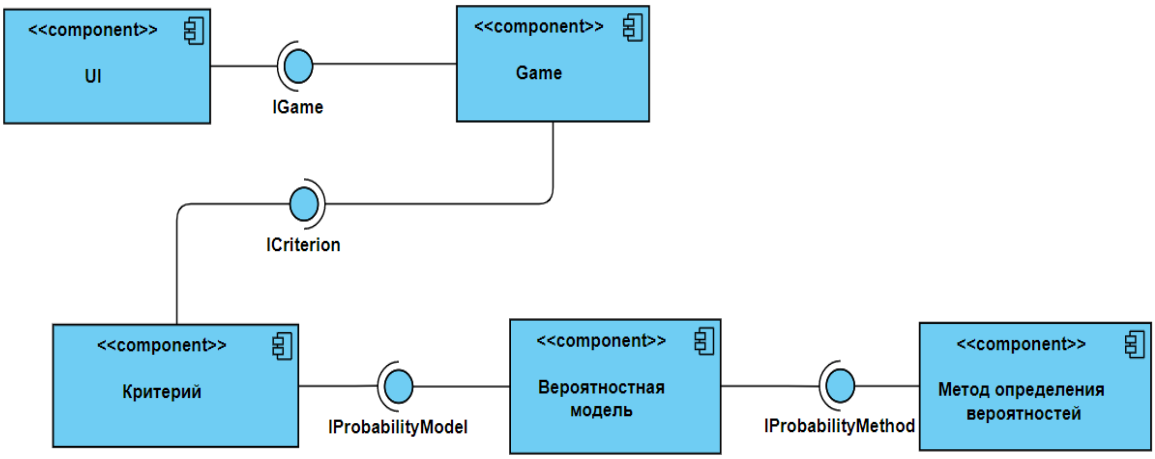


Рис. 2. UML-диаграмма компонентов разрабатываемого модуля

Компонент «Game» является общим и оборачивает весь комплекс взаимодействующих компонентов так, что пользователь не знает всей бизнес-логики приложения, но при этом позволяющий пользователю взаимодействовать со всей системой, заменяя некоторые из элементов системы.

Итоги: поставленная цель достигнута и все необходимые для достижения цели задачи были выполнены. В процессе разработки модуля был предложен доработанный принцип определения вероятностей на основе предположений экспертов. Такой принцип высчитывает вероятности на основе матожидания предположений экспертов с корректировкой на коэффициент согласованности между экспертами.

Программная реализация модуля с использованием собственных идей представляет из себя библиотеку классов, включающей интерфейсы и их реализации. Для достижения гибкости в настройке системы каждый из компонентов взаимодействовал с остальными посредством разработанных интерфейсов, так была достигнута гибкость в настройке игровой системы пользователем и возможность дополнения модуля собственными реализациями некоторых компонентов программы, не изменяя логику разработанного модуля. Предполагается, что данная разработка может стать пакетом в механизме совместного использования кода NuGet и может быть интегрирована в существующие или разрабатываемые программные продукты [5].

Литература

1. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений – краткий обзор [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://habr.com/ru/company/ods/blog/359188/ (дата обращения: 01.07.2020).
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200090083 (дата обращения: 01.07.2020).
3. Байесовские игры. Лекционный материал // Белорусский государственный университет. Автор: Писарук Н.Н. 2014 г. 137 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pisaruk-9591.appspot.com/static/slides/games/bayesGames.pdf (дата обращения: 01.07.2020).
4. Прохоров Ю.К., Фролов В.В. Управленческие решения: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб: СПбГУ ИТМО. 2011. 138 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://books.ifmo.ru/file/pdf/817.pdf (дата обращения: 01.07.2020).
5. Документация по NuGet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.microsoft.com/ru-ru/nuget/ (дата обращения: 01.07.2020).

Тищук Богдана Юрьевна
Год рождения:1998
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
студент группы №P3401,
направление подготовки: 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника,
e-mail: tishuk52@gmail.com
Быковский Сергей Вячеславович
Год рождения: 1989
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
к.т.н.,
e-mail: sergei_bykovskii@itmo.ru

УДК 004.3

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДВЫБОРКИ ДАННЫХ ДЛЯ КЭШ-ПАМЯТИ ПЕРВОГО УРОВНЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОРОВ С АРХИТЕКТУРОЙ RISC-V

Б.Ю. Тищук
Научный руководитель – к.т.н. С.В. Быковский

Аннотация
Предвыборка данных в кэш-память – один из эффективных механизмов повышения производительности подсистемы памяти за счет уменьшения количества кэш-промахов. В данной работе рассматриваются основные паттерны доступа к памяти и проводится анализ характеристик основных алгоритмов предвыборки данных. Также в данной работе представлен разработанный алгоритм предвыборки данных, устраняющий недостатки алгоритма RPT, который является одним из наиболее эффективных для регулярных паттернов доступа к памяти, и предотвращающий 60% кэш-промахов в среднем при работе с регулярными паттернами доступа различной сложности.

Ключевые слова
Предвыборка данных, кэш-память, производительность подсистемы памяти, кэш-промах, RISC-V, паттерн доступа к памяти.

Введение

Разрыв в производительности современных микропроцессоров и оперативной памяти составляет сотни тактов. Чтобы нивелировать снижение производительности в следствии этого факта используются такие механизмы, как многоуровневое кэширование, внеочередное исполнение, TLB-кэширование, предвыборка данных и команд в кэш - память различных уровней [1]. Кэш промахи значительно ухудшают производительность вычислительной системы, следовательно, от эффективности работы блоков предвыборки значительно зависит производительность вычислительной системы в целом.

В настоящий момент в современных архитектурах блоки предвыборки оптимизированы либо под регулярные паттерны доступа к памяти, либо оперируют временными или пространственными корреляциями цепочек доступов в память.

Паттерны доступа к памяти

Паттерны доступа к памяти — последовательность обращений к памяти на определенном временном промежутке или в рамках выполнения определенной задачи. Обращения к памяти могут иметь определенную закономерность или могут быть произвольными, без какой – либо четко прослеживаемой закономерности. В первом случае паттерн доступа к памяти будет регулярным, во втором случае – нерегулярным. Как показывают недавние исследования [2] – около 70% точных предвыборок осуществляется за счет точного определения регулярного паттерна доступа к памяти.

Из регулярных паттернов доступа к памяти можно выделить следующие:

1. Последовательные обращения - в данной ситуации происходят обращения на чтение или запись к последовательным словам в памяти.
2. Обращение с шагом - в данной ситуации происходят обращения на чтение или запись к адресам памяти с определенным шагом.
3. Линейные комбинации шагов - при таком паттерне доступа обращения к памяти на чтение и запись происходят с определенной последовательностью шагов.
4. Обращение в пределах ограниченной двумерной области - данный паттерн доступа подразумевает обращения на чтение и запись на множестве адресов, которые можно ограничить определенной двумерной областью, например при обработке изображения.
5. Рассеивание (Scatter) - в данном случае происходят последовательные чтения, а последовательность обращений на запись близка к случайной. Противоположностью является паттерн Сбор (Gather), когда последовательность обращений к памяти на чтение близка к случайной, а последовательность обращений по записи последовательна

Нерегулярные паттерны доступа к памяти имеют последовательность адресов обращений к памяти на чтение и запись близкую к случайной. Такой паттерн доступа могут иметь различные операции со связными списками, множествами, хэш-таблицами, выполнение системных функций. Нерегулярные паттерны доступа так же наиболее сложны для аппаратной предвыборки [3, 5].

Метрики предвыборки

Основной целью работы блоков предвыборки является уменьшение количества кэш – промахов и, как следствие, ускорение выполнения задачи. Основными характеристиками предвыборки являются покрытие, точность и ускорение. Покрытие показывает, какая доля кэш-промахов была предотвращена предвыборкой. Данную метрику можно рассчитать по формуле 1:

$$c = \frac{m - n}{m} * 100\%, \quad (1)$$

где c – покрытие, m — количество кэш-промахов без блока предвыборки, n – количество кэш-промахов с блоком предвыборки.

Другой основной метрикой является точность. Данная метрика показывает, какая доля предвыбранных данных была использована в дальнейшем. Точность описывается отношением 2:

$$\frac{h}{p} * 100\%, \text{ где } h = m - n, \quad (2)$$

h – количество предвыбранных кэш-линий, которые были использованы, p – количество всех предвыборок.

Третьей основной метрикой является ускорение – показывающее, на сколько быстрее выполняется задача при использовании блока предвыборки. Данная метрика может быть рассчитана по формуле 3:

$$\left(\frac{a - b}{a}\right) * 100\%, \quad (3)$$

где a – количество тактов без предвыборки, b – количество тактов с предвыборкой.

Разработка алгоритма предвыборки данных

Существующие исследования показывают, что большинство эффективных предвыборок осуществляется за счет точного определения шага или последовательности шагов при регулярных паттернах доступа к памяти. Одним из наиболее эффективных алгоритмов предвыборки, оптимизированных для регулярных паттернов доступа к памяти является RPT алгоритм [4]. Однако, алгоритм RPT в классическом виде имеет ряд недостатков и сложностей при реализации:

1. RPT использует адрес инструкции при адресации к Reference Prediction Table. Необходимость хранения и распространения адреса инструкции в кэш-памяти увеличит площадь на кристалле и энергопотребление. Оценочно, динамическое энергопотребление может возрасти на 15% для аппаратного блока очереди запросов в кэш-память от ядра. Также это подразумевает сильную связанность ядра и кэш-памяти.
2. RPT не учитывает то, что некоторая область данных, к которой происходят обращения может уже присутствовать к кэш-памяти, и для нее не нужно генерировать запросы предвыборки.
3. Классический RPT также не предусматривает отрицательный шаг, из – за чего оказывается неэффективным для простых последовательностей обращений к памяти с отрицательным шагом.

Разработанный алгоритм предвыборки IRP (Improved Regular Prefetcher) основан на принципах RPT, с устранением вышеописанных недостатков, присущих RPT. Основным элементом разработанного блока предвыборки является таблица шагов, хранящая метаданные об обращениях к памяти. На рис. 1 представлена структура блока предвыборки, работающего по алгоритму IRP.

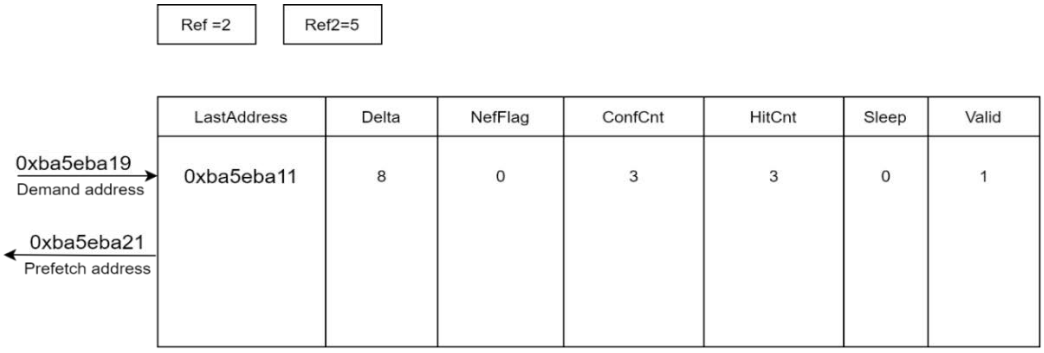


Рис. 1. Таблица IRP

Данная таблица состоит из N идентичных строк, называемых stride entry. Она состоит из полей LastAddress, Delta, NegFlag, ConfCnt, HitCnt, и полей состояния: Sleep, Valid. Поле LastAddress хранит адрес предыдущего обращения к памяти на чтение, Delta содержит шаг (stride), NegFlag указывает на то, отрицательный шаг или положительный, ConfCnt – счетчик доверия, необходимый для более точного детектирования паттерна доступа. HitCnt – счетчик идущих подряд попаданий в кэш-память. Поле Sleep указывает на то, что строка находится в состоянии сна, Valid – то что строка содержит валидные данные.

Альтернатива разделению последовательности шагов по адресу инструкции

В разработанном блоке предвыборки было решено не использовать адрес инструкции для разделения последовательности шагов и адресации в таблице. Вместо этого используется диапазон контроля для каждой строки (stride entry). Любой адрес обращения к памяти на чтение может попадать в диапазон единственной строки, или не попадать в диапазоны ни одной из строк. Регулярные паттерны доступа так же имеют временную и пространственную локальность, поэтому предполагается, что вблизи адреса обращения паттерн доступа не будет меняться.

В выборе ширины диапазона учтено то, что слишком узкий диапазон приведет лишним выделениям строк и вытеснениям, а слишком широкий диапазон может привести к захвату посторонних обращений (имеющих другой паттерн доступа).

Выделение строки происходит по кэш-промаху при чтении. Предполагается, что если произошел кэш-промах, и адрес не входит в диапазон контроля ни одной из строк, то это новый паттерн доступа, для которого выделяется новая строка в таблице.

Возможные состояния строки в таблице предвыборки

На рис. 2 показаны возможные состояния строк и переходы между состояниями. Каждая строка может быть в начальном состоянии, когда находящиеся в ней данные невалидны. В это состояние по умолчанию устанавливаются все строки после старта процессора или при очистке блока предвыборки. Из начального состояния может быть осуществлен переход в состояние обучения при выделении строки. После обучения строки и определения паттерна доступа строка переходит в активное состояние, в котором она продолжает наблюдать за запросами к памяти на чтение и генерирует запросы предвыборки. Предвыборка может генерироваться только в активном состоянии. При достижении HitCnt значения Ref2 строка переходит в состояние сна из активного состояния или обучения, полагая, что контролируемая область находится в кэш-памяти данных первого уровня. Из состояния сна можно перейти в активное состояние или обучение при кэш-промахе.

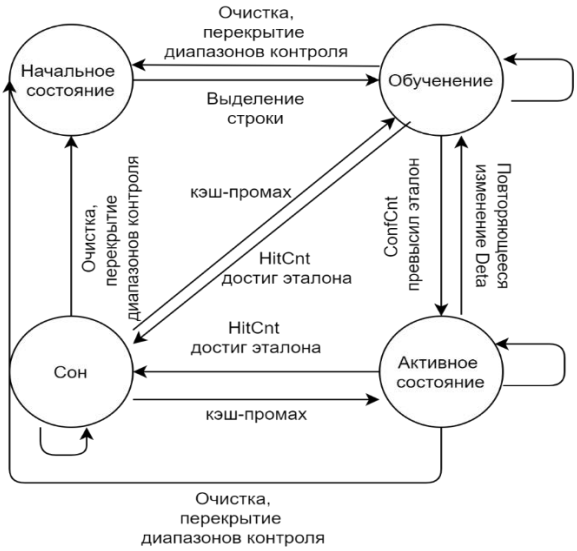


Рис. 2. Переходы между состояниями

Обучение строки (Stride entry training)

После выделения новой строки, все ее поля, кроме LastAddress и Valid, обнуляются и начинается процесс обучения. LastAddress записывается текущим адресом, вызвавшим кэш-промах, Valid устанавливается равным единице. Блок

предвыборки отслеживает обращения к памяти на чтение. Если адрес попадает в диапазон контроля данной строки, то далее рассчитывается разность текущего адреса и поля LastAddress, которая записывается в поле Delta, если Delta меньше нуля, устанавливается флаг NegFlag.

Наблюдение и предвыборка

После этого блок предвыборки продолжает отслеживать адреса обращений к памяти. Если разность адреса обращения совпадает со значением поля Delta, счётчик доверия инкрементируется, в случае несовпадения – декрементируется. При достижении счётчиком доверия значения Reference инициируется предвыборка. В очередь запросов предвыборки помещается запрос по адресу, равному сумме полей LastAddress и Delta. При достижении счетчиком доверия нуля поля Delta и NegFlag перезаписываются разницей текущего адреса и поля LastAddress и знаком разности соответственно.

Состояние сна

Введение состояния сна решает проблему «холостых» предвыборок в RPT, когда некоторая область присутствует в кэш-памяти, но блок предвыборки все равно генерирует запросы на предвыборку, если соответствующая запросу.

Если кэш-попадания случаются определенное количество раз подряд, это значит, что область, к которой происходят обращения на чтение закэширована, и не нужно генерировать запросы предвыборки для нее. В состоянии сна строка так же отслеживает запросы к памяти на чтение, обновляет поля так же, как и в состоянии наблюдения, но не генерирует запросы предвыборки.

Строка переводится обратно из состояния сна в действующее при одновременном кэш-промахе и попадании адреса в диапазон контроля строки.

Результаты

Исследование разработанного алгоритма проводилось на наборе тестов производительности Tacle. Для этого была разработана поведенческая модель блока предвыборки данных, работающего по предложенному алгоритму и интегрирована в модель подсистемы памяти микроархитектурного симулятора MARSS-RISCV и запущены тесты производительности на конфигурациях симулятора с моделью блока предвыборки и без.

На рис. 3 показаны результаты симуляции на тесте Matrix из набора Tacle

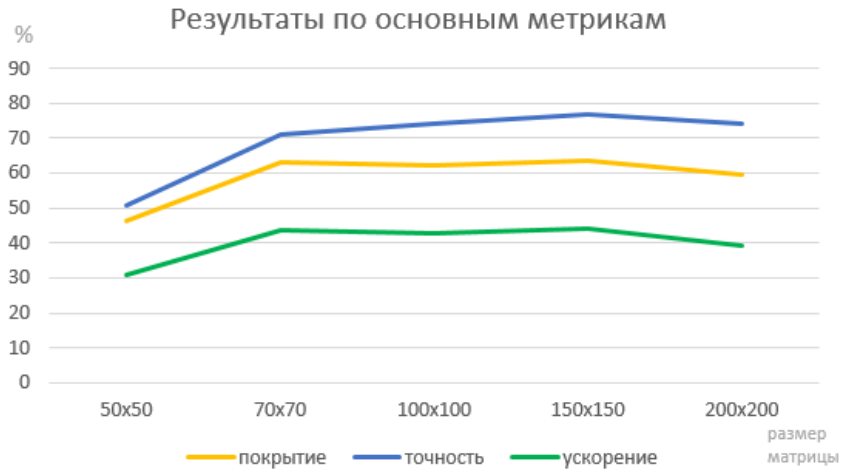


Рис. 3. График показателей по основным метрикам предвыборки

Симуляция показала, что разработанный алгоритм на регулярных паттернах

доступа к памяти в среднем предотвращает 60% кэш-промахов, и ускоряет выполнение задачи в среднем на 40%. Также видно, что в среднем 70% предвыбранных данных используется при дальнейшем выполнении задачи.

Заключение

В рамках данной работы были исследованы различные паттерны доступа к памяти, методы предвыборки и разработан алгоритм аппаратной предвыборки.
На основании теоретических исследований паттернов доступа к памяти и алгоритмов предвыборки был разработан алгоритм аппаратной предвыборки IRP, который покрывает большинство регулярных паттернов доступа к памяти. Данный алгоритм имеет принципы алгоритмов с RPT, однако не использует адрес инструкции для поиска в таблице хранения метаинформации об обращениях к памяти. Также в разработанном алгоритме предвыборки предусмотрен механизм предотвращения генерации запросов предвыборки, если область, к которой происходят обращения уже находится в кэш-памяти первого уровня. Разработанный алгоритм работает с виртуальными адресами, что обеспечивает возможность эффективной работы при большом шаге. Данный алгоритм показывает покрытие более 60% и ускорение 40% в среднем при работе с регулярными паттернами доступа.

В настоящее время ведутся исследования возможности усовершенствования алгоритма, улучшения показателей по метрикам, охвата большего количества регулярных паттернов доступа к памяти, например, обращения в пределах ограниченной двумерной области.

Литература

1. Harris D., Harris S. Digital Design and Computer Architecture. M. Morgan Kaufman, 486-529c.
2. Kondguli, S., Huang, M. T2: A highly accurate and energy efficient stride prefetcher // Proceedings - 35th IEEE International Conference on Computer Design, ICCD. 2017. c. 373-376.
3. Wu H., Nathella K., Sunwoo D., Jain A., Lin C. Efficient metadata management for irregular data prefetching // Proceedings - International Symposium on Computer Architecture. 2019. c. 449-461.
4. Huaiyu Zhu, Yong Chen and Xian-He Sun. Timing Local Streams: Improving Timeliness in Data Prefetching // Proceedings of the International Conference on Supercomputing. 2010. c.169-178/.
5. Jain A., Lin C. Linearizing irregular memory accesses for improved correlated prefetching // Proceedings of the 46th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture. 2013. c. 247-259.

ЛАУРЕАТЫ II СТЕПЕНИ КОНКУРСА
НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»

Быков Дмитрий Иванович
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы № B3432,
направление подготовки: 16.03.01 – Техническая физика,
e-mail: dmitrii.bykov@itmo.ru
Бахолдин Алексей Валентинович
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н., доцент,
e-mail: bakholdin@itmo.ru

УДК 535-2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АНОМАЛОСКОПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Д.И. Быков
Научный руководитель - к.т.н., доцент А.В. Бахолдин

Аннотация
В данной выпускной квалификационной работе рассматривается прибор для выявлений аномалий цветового зрения у человека – аномалоскоп АН-59 (ГОИ). При помощи компьютерной модели, аберрационного, габаритного и цветового расчётов его оптической системы были восстановлены конструктивные характеристики прибора, а также подобраны оптические материалы, необходимые для создания современного аналога аномалоскопа с учётом всех его режимов работы.
Ключевые слова
Аномалоскоп, цветовое зрение, компьютерное моделирование, светофильтры, медицинские приборы.

В современном мире качественная и быстрая оценка состояния цветового зрения является актуальной задачей. Высокие требования по данному параметру предъявляются к работникам ювелирной, военно-промышленной, автомобильной и другим отраслям, а значительная часть населения планеты имеет дефекты цветовосприятия зрительной системы и нуждается в прохождении такого исследования. Для диагностики расстройств цветоощущения существуют две основные группы методов: пигментные и спектральные. Пигментный метод заключается в использовании готового набора цветовых раздражителей, которые предъявляются пациенту. Спектральная оценка позволяет выявлять нарушения с помощью особых технических приборов – аномалоскопов [1].

В данной работе исследуется модель аномалоскопа АН-59 (ГОИ) [2]. Он построен на использовании явления трёхмерности цвета, то есть на теории о наличии в сетчатке глаза трёх видов клеточных светочувствительных приёмников, различающихся по своей спектральной чувствительности. На аномалоскопе АН-59 проводятся четыре вида испытаний цветового зрения. Три из них касаются цветоразличения. Таким образом на приборе проводятся раздельные испытания каждой из трёх систем приёмников, и это является его конструктивной особенностью. В первом испытании производится оценка остроты цветоразличения для приёмников в красно-жёлтой области спектра. Во втором и третьем, соответственно, для зелёных и синих

приёмников. Все эти три испытания построены на изменении цвета одной из двух половин поля зрения прибора, вначале совершенно тождественных. В каждом испытании фиксируется момент, когда сознание сможет ощутить наступившее изменение цвета одного полуполя. Четвёртое испытание построено на чисто колориметрической методике сложения цветов – на установлении цветового равенства. Здесь достигается оценка типичности цветового зрения – нормальности или аномальности спектральной чувствительности приёмников сетчатки. Целью работы является компьютерное моделирование оптической системы аномалоскопа во всех режимах работы, а также её применение для анализа цветового зрения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- провести экспериментальный анализ спектрального пропускания светофильтров для возможности подбора аналогичных материалов;
- провести цветовые расчёты, графически представить их на хроматических диаграммах и создать модели светофильтров в «Zemax OpticStudio»;
- провести габаритный и аберрационный расчёты оптической системы аномалоскопа и создать чертежи на оптические компоненты и детали;
- создать компьютерную модель прибора с учётом всех режимов работы;
- применить модель для воссоздания картины поля зрения для различных аномалий цветового зрения.

Было проведено экспериментальное исследование спектральной зависимости коэффициента пропускания светофильтров, установленных в оптической системе аномалоскопа АН-59. В качестве экспериментальной установки использовался спектрофотометр с монохроматором МДР-206 [3], на котором была снята спектральная зависимость коэффициента пропускания для всех 14 светофильтров. Результатом данного этапа стали графические зависимости, а также численные значения коэффициента пропускания для длин волн с шагом в 10 нм. На рис. 1 представлено изображение экспериментальной установки, а также полученный график спектральной зависимости коэффициента пропускания для одного из образцов.

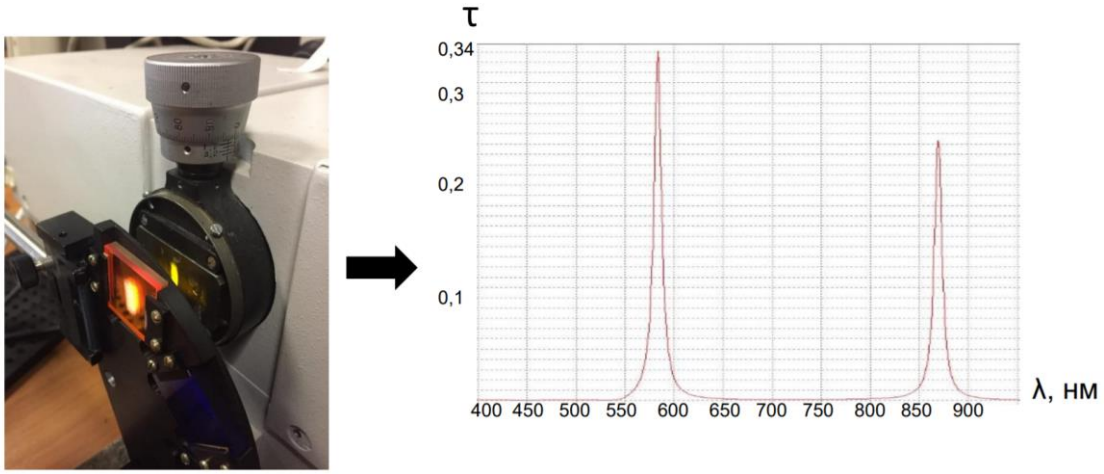


Рис. 1. Экспериментальное исследование светофильтров

На основании данных, полученных в ходе эксперимента, были проведены цветовые расчёты для каждого светофильтра, что позволило найти координаты цветности для излучения, проходящего через них, а также для системы светофильтров, что было необходимо для изучения зависимости изменения координат цветности излучения при поперечном смещении каждого светофильтров. Для этого необходимо учитывать не только спектральное пропускание систем светофильтров, установленных

в аномалоскопе, но и тип источника, используемого в нём. Так в аномалоскопе АН-59 установлен источник типа А - газополная электрическая лампа накаливания с коррелированной цветовой температурой излучения Т = 2856 К. Согласно ГОСТ 7721-89 «Источники света для измерения цвета» [4] координаты цвета Хф, Уф, Zф полученного составного светофильтра при источнике света типа А рассчитывают по формулам:

$$X_ф = \sum_\lambda \Phi_\lambda^A \bar{x}(\lambda)\tau_Ф(\lambda),\ \ Y_ф = \sum_\lambda \Phi_\lambda^A \bar{y}(\lambda)\tau_Ф(\lambda),\ \ Z_ф = \sum_\lambda \Phi_\lambda^A \bar{z}(\lambda)\tau_Ф(\lambda),$$

где произведения Ф берутся из ГОСТ 7721-89, а τ – коэффициент спектрального пропускания светофильтра, полученный в ходе эксперимента. Координаты цветности для излучения, проходящего через светофильтр, вычисляются по следующим формулам [5]:

$$x_Ф = \frac{X_Ф}{X_Ф + Y_Ф + Z_Ф},\ \ y_Ф = \frac{Y_Ф}{X_Ф + Y_Ф + Z_Ф},\ \ z_Ф = \frac{Z_Ф}{X_Ф + Y_Ф + Z_Ф}.$$

Таким образом были посчитаны координаты цветности для всех светофильтров в системе.

Для системы светофильтров было проведено аддитивное сложение двух цветов в системе XYZ. Для этого было введено понятие цветового модуля m – который показывает количество того или иного цвета. В случае аномалоскопа цветовой модуль пропорционален площади, вводимой в поток света. Для расчёта были использованы формулы для координат цветности смеси излучения:

$$x = \frac{\sum_n x_n m_n}{\sum_n m_n},\ \ y = \frac{\sum_n y_n m_n}{\sum_n m_n}.$$

На основании полученных в ходе расчётов координатах цветности были подобраны аналоги оптических материалов, которые аналогичные по своим характеристикам тем, что используются в аномалоскопе АН-59.

В таб. 1 приведены результаты подбора материалов. Критерием оценки возможности использования аналога стало цветовое отличие, обозначаемое дельта Е – математическое представление, позволяющее численно выразить различие между двумя цветами. Для человеческого глаза цвета, согласно международному стандарту, разработанному совместно с международной комиссией по освещённости, дельта Е которых меньше единицы, считаются неразличимыми, поэтому можно утверждать, что подобранные материалы могут быть использованы в качестве аналогов.

Вторым этапом работы являлось создание компьютерной модели оптической системы аномалоскопа АН-59. Для проведения дальнейших цветовых исследований важно учитывать характеристики источника и светофильтров. В качестве программного продукта был выбран «Zemax OpticStudio». Итогом данного этапа стала компьютерная модель, изображённая на рис. 2, которая была сделана в непоследовательном режиме трассировки луча, который позволяет произвести моделирование режимов работы, а также учесть взаимное расположение всех компонентов в пространстве. В модели были учтены характеристики источника типа «А», применяемого в аномалоскопе, диффузное рассеяние на экранах, зависимость коэффициента пропускания светофильтров от длины волны, а также перпендикулярное

смещение фильтров относительно оптической оси с точностью, соответствующей одному делению измерительного барабана, расположенного на аномалоскопе АН-59.

Таблица 1

Подбор аналогов цветного оптического стекла

Цвет фильтра	Координаты цветности фильтров в системе	Аналог из каталога ООО «Электростекло»	Цветовое отличие (ΔE≤1 из ISO/CIE 11664-6:2014)
зелёный	x = 0.29 y = 0.68	ЖЗС12 x = 0.28 y = 0.68	ΔE = 0.21
синий	x = 0.17 y = 0.03	СС4 x = 0.17, y = 0.04	ΔE = 0.47
пурпурный	x = 0.58 y = 0.33	ПС7 (x = 0.45 y = 0.35) ПС8 (x = 0.69 y = 0.32) Суммарно: x = 0.57, y = 0.335	ΔE = 0.89
сине-зелёный	x = 0.14 y = 0.36	СЗС22 x = 0.16 y = 0.36	ΔE = 0.13
красный	x = 0.715 y = 0.272	КС15 x = 0.720 y = 0.270	ΔE = 0.19
оранжевый	x = 0.52 y = 0.48	ЖС16 x = 0.52 y = 0.46	ΔE = 0.64
синий	x = 0.15 y = 0.04	СС15 x = 0.15 y = 0.05	ΔE = 0.23

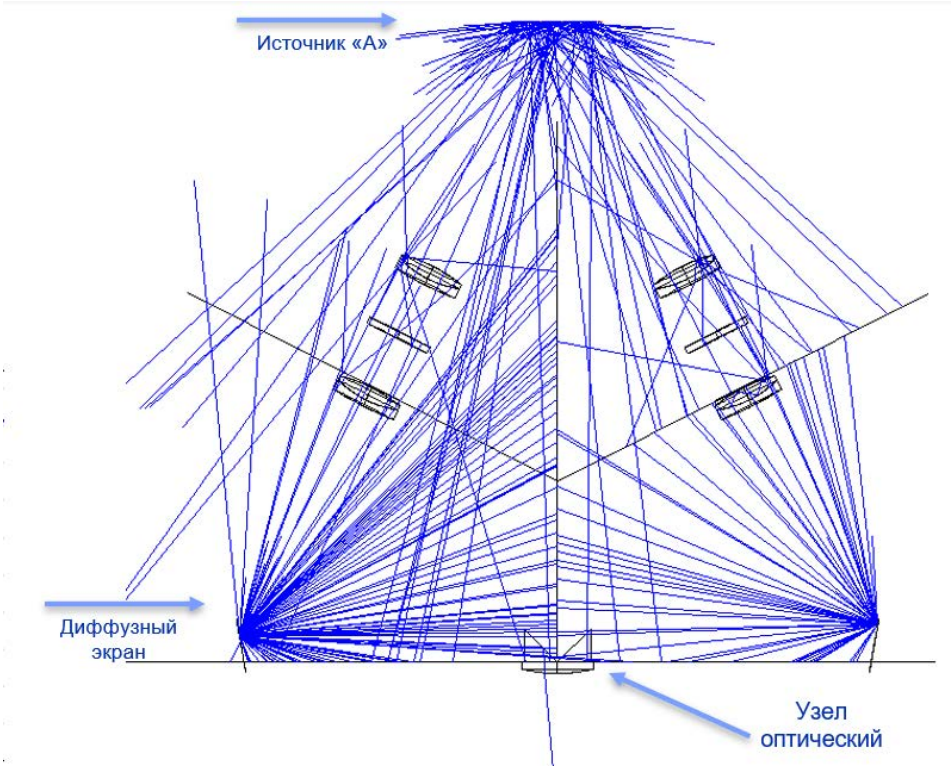


Рис. 2. Компьютерная модель в непоследовательном режиме трассировки луча

Для определения конструктивных параметров оптических компонентов был проведён габаритный и аберрационный расчёт. Для расчёта двухлинзового склеенного объектива были использованы два метода: расчёт простых ахроматов по методике В.Н. Чуриловского и программа автоматизированного расчёта по методике Г.Г. Слюсарева с коррекцией хроматизма положения, сферической аберрации и комы. Также важным критерием при подборе материалов стало пропускание во всём рабочем спектральном диапазоне прибора. В таб. 2 представлены характеристики, полученные в ходе расчёта с использованием программы автоматизированного расчёта по методике Г.Г. Слюсарева, так как данный объектив был использован в модели.

Таблица 2

Конструктивные параметры склеенного объектив

№ поверхности	R, мм	d, мм	Марка стекла
1	75,84	6	К8
2	-48,33	3	Ф9
3	-187,75		

Заключительным этапом работы стало моделирование аномальных состояний. Это позволило проверить работоспособность модели и правильность проведённых расчётов. Для этого в компьютерной модели было задано смещение светофильтров относительно оптической оси для значений измерительных барабанов, соответствующих норме цветного зрения, а также для различных отклонений. Таким образом на рис. 3 и рис. 4 можно наблюдать виды полей зрения, которые наблюдаются нормальным глазом в приборе для различных значений делений (m) измерительных барабанов.

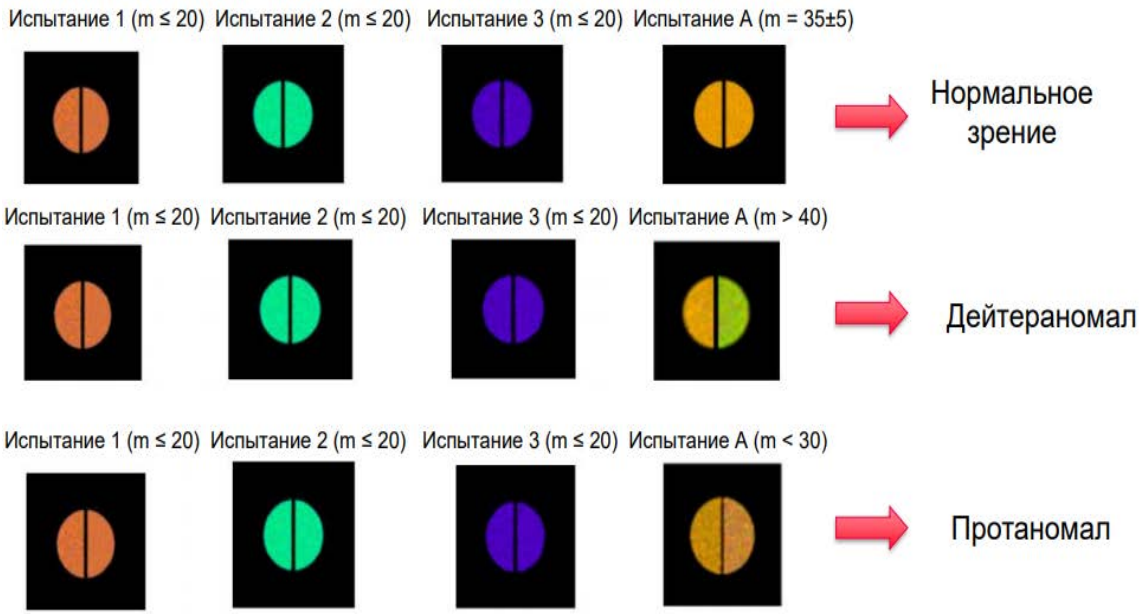


Рис. 3. Моделирование полей зрения для нормального зрения, дейтераномалии и протаномалии

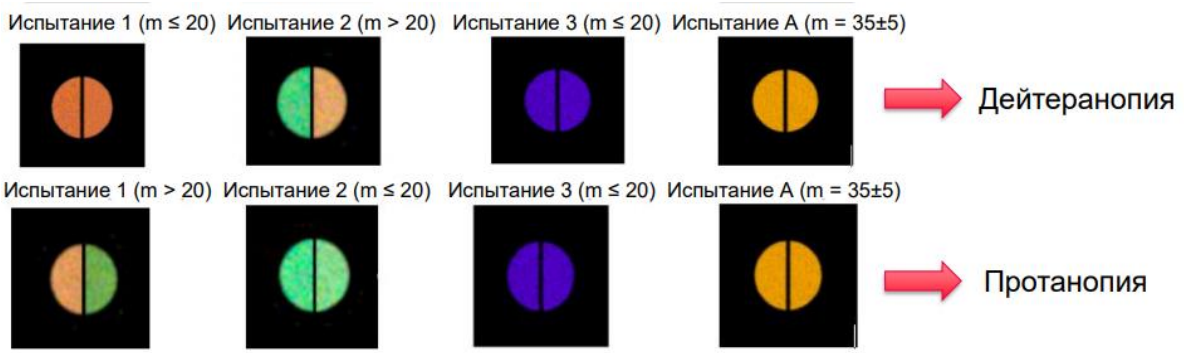


Рис. 4. Моделирование полей зрения для дейтеранопии и протанопии

Перспективы работы заключаются в возможности использования компьютерной модели для создания аналога аномалоскопа АН-59, измерения на котором могут быть автоматизированы. Это может послужить развитию и повышению доступности приборов для быстрой и точной оценки цветового зрения, а также созданию более компактной и эргономичной версии аномалоскопа, тем самым расширив современный рынок медицинского офтальмологического оборудования.

Все поставленные в рамках работы задачи выполнены:

- проведён экспериментальный анализ спектральной зависимости коэффициента пропускания светофильтров, установленных в оптической системе аномалоскопа АН-59;
- подобраны материалы для создания аналогов светофильтров;
- проведены цветовые расчёты и графическое представление их результатов на хроматических диаграммах;
- выполнены габаритный и аберрационный расчёты оптической системы аномалоскопа;
- создана конструкторская документация на оптические компоненты и детали;
- создана компьютерная модель прибора с учётом всех режимов работы;
- при помощи компьютерной модели получены картины поля зрения для различных аномалий цветового зрения.

Таким образом, достигнута основная цель работы, заключающаяся в создании компьютерной модели оптической системы аномалоскопа с учётом всех его режимов работы.

Литература

1. Fanlo Zarazaga A., Gutiérrez Vásquez J., Pueyo Royo V. Review of the main colour vision clinical assessment tests / A. Fanlo Zarazaga // Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología (English Edition). 2019. №94.
2. Аномалоскоп: Модель АН-59: Описание конструкции и методики работы / Всесоюз. объединение "Машприборинторг". Москва. Внешторгиздат. 1963. 24 с.: ил.
3. Жукова Е.В. Оптическая физика. Методические рекомендации к лабораторному практикуму. – СПб: Университет ИТМО. 2019. 50 с.
4. ГОСТ 7721-89 Источники света для измерений цвета. Введён 28.06.89. М. Издво стандартов. 1989. 19 с.
5. Новаковский С.В. Цвет в цветном телевидении. М. Радио и связь. 1988. 288 с.

Егорова Елена Евгеньевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы №L3416,
направление подготовки: 12.03.05 – Лазерная техника и лазерные технологии,
e-mail: elena1998959@gmail.com
Одинцова Галина Викторовна
Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н.,
e-mail: gvodintsova@itmo.ru

УДК 53.096, 576.52

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА

Е.Е. Егорова
Научный руководитель – к.т.н., н.с. Г.В. Одинцова

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления 218 от 09.04.2010 г., Соглашение №075-11-2019-066 от 22.11.2019 г.

Аннотация
В работе рассмотрено лазерное микроструктурирование поверхности титановых дентальных имплантов. Структурирование производилось при помощи наносекундного волоконного лазера с длиной волны 1.06 мкм. Подобраны оптимальные режимы, обеспечивающие определённую глубину, период, форму и химический состав поверхности, которые позволяют достичь высокую остеоинтеграцию, доказанную испытаниями *in vivo*. А также определены параметры лазерного воздействия для создания оксида на поверхности, который препятствует прикреплению бактерий.

Ключевые слова
Дентальные имплантаты, титановые импланты, лазерная микро- и нанообработка, лазерное структурирование, оксид титана, биосовместимость, остеоинтеграция, *in vivo*, антибактериальность, клеточная адгезия.

В медицине для реконструирования дефектов костей, протезирования зубов и т.д. используются импланты из титана. Данный материал обладает рядом существенных преимуществ [1], что относит его к группе биосовместимых материалов [2]. Однако человеческий организм воспринимает любое инородное тело как враждебное и в некоторых случаях происходит отторжение импланта, что приводит к осложнениям и повторным операциям. К тому же, на импланте могут развиться бактериальные колонии, провоцирующие возникновение инфекций, которые отрицательно сказываются на приживаемости и могут привести к переимплантиту [3]. Существующие методы обработки титана не позволяют добиться максимальной остеоинтеграции и минимизировать риск возникновения инфекций, т.к. пескоструйная

обработка и анодирование могут оставить на поверхности частички порошка или кислоты [4, 5], а применение антибиотиков в борьбе с инфекциями может стать неэффективным вследствие развития резистентности у бактерий. В данной работе предлагается альтернатива популярным методам обработки – лазерное структурирование, т.к. при лазерной обработке рельеф формируется, благодаря испарению материала, без использования химических реагентов, и как следствие, без остаточных загрязнений. К тому же, при лазерной обработке можно добиться создания микро- и нано- рельефа с различной топографией и химическим составом поверхности, что может положительно повлиять на остеоинтеграцию [6] и уменьшить риск возникновения инфекций [7]. Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что создание лазерно-индуцированных структур, обладающих биосовместимыми и антибактериальными свойствами, является актуальной задачей на сегодняшний день.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния лазерно-индуцированных структур титана на биосовместимость и антибактериальность. Для выполнения поставленной цели были определены следующие задачи: разработка и создание рельефа, обладающего гидрофильными свойствами, с микро- и нано-шероховатостью, соизмеримой с клетками костной ткани (12-30 мкм) и белками соответственно; разработка и формирование структуры, обладающей антибактериальными свойствами; проведение эксперимента *in vivo* (внутри живого организма), и оценка параметров остеоинтеграции; проведение эксперимента по определению антибактериальных свойств.

Для исследования влияния режимов лазерного излучения на рельеф поверхности были выбраны образцы из технического титана марки ВТ6. Структурирование образцов производилось на прецизионной лазерной установке «Минимаркер-2» на базе волоконного иттербиевого импульсного лазера. Рельеф поверхности и его параметры шероховатости были оценены с использованием оптического микроскопа Zeiss Axio Imager A1.m, сканирующего микроскопа Zeiss Merlin и профилометра Hommel wave tester 8000. Для анализа химического состава полученной модифицированной поверхности было проведено исследование методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопов FEI Helios 660 (на электронном и ионном режимах) и FEI Quanta 600 с полевой эмиссией, оснащенных энергодисперсионным спектрометром (EDX) (разрешение EDX-анализа 0,20). – 0,25 %, элементы из Be). При определении смачиваемости структур, на поверхность была высажена капля объемом 0,5 мкл из дозатора модели Mechanical pipette Satorius 0,1-10 мкл. Анализ параметров остеоинтеграции был сделан по микрофотографиям с оптического микроскопа с использованием программ Digimizer Image Analysis Software и ImageJ. Эксперимент *in vivo* был проведен при поддержке Первого Санкт-Петербургского Государственного Медицинского Университета им. акад. Павлова. Анализ бактериальной адгезии и образования биопленки были исследованы в Ганноверской медицинской школе под руководством Катерины Долл.

Известно, что биосовместимая поверхность должна быть гидрофильной для обеспечения распространения биологических жидкостей [8], обладать микро- и нано-рельефом для необходимой адгезии клеток и белков [9]. Структуры должны быть соизмеримы с клетками костной ткани – остеоцитами, размер которых варьируется в диапазоне от 12 до 30 мкм [10], чтобы способствовать остеогенезу. Для выбора оптимального режима структурирования дентальных имплантов была исследована зависимость ширины и глубины канавок, образованных лазерным воздействием, от плотности мощности и количества проходов. И были выбраны две структуры с микро и нано шероховатостью, обладающие геометрическими структурами (канавками и лунками) в необходимом диапазоне, которые по исследованию смачиваемости показали супергидрофильные свойства: структура K и структура L (рис. 1). Так как

данные структуры удовлетворяют всем перечисленным критериям биосовместимости, предположено, что они улучшат и приживаемость импланта.

Для подтверждения данного предположения, были проведены тесты *in vivo*. В эксперименте учувствовали 15 кроликов, особей женского пола, весом 2,5 – 3 кг. В их большеберцовые кости вживляли импланты. 1 кролик выбыл до начала эксперимента, 4 были выведены через 1,5 месяца, а оставшиеся после 3-месячного периода заживления. Образцы разрезали на срезы толщиной 100 мкм вдоль оси каждого импланта и шлифовали до толщины 50 – 80 мкм. Для визуального выделения клеток на образцах было применено окрашивание толуидиновым синим.

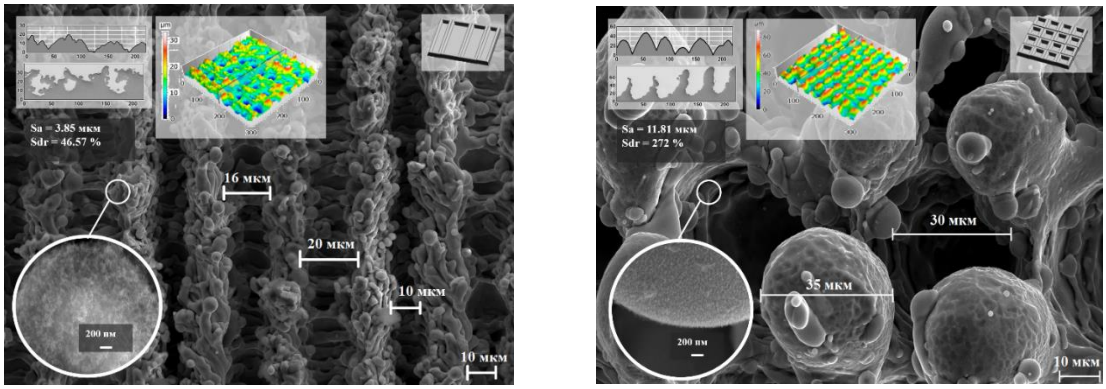


Рис. 1. СЭМ-изображение структур в микро- и нано- масштабе с профилограммой поверхности и указанием ее шероховатости. Слева - структура K, полученная при q = $31 \cdot 10^6$ Вт/см^2, V = 5 мм/с, f = 1,6 кГц, N = 11 лин/мм, 3 прохода (при сдвиге по оси Y на 30 мкм). Справа - структура L, полученная при q = 63 ·106 Вт/см2, V = 200 мм/с, f = 60 кГц, N = 20 лин/мм, 2 прохода (при второго прохода относительно первого на 90 градусов)

Для оценки биосовместимости импланта были рассчитаны следующие параметры остеоинтеграции: BIC – Bone Implant Contact (контакт костной ткани с имплантом); FIC – Fibrious Implant Contact (контакт фиброзной ткани с имплантом); C.A. - Cell Area – поверхность, занимаемая клетками костной ткани; N.O.C. - Number of Cell – количество клеток костной ткани; A.O.C. - Area of a Cell – средняя площадь одной клетки костной ткани [11, 12].

Уменьшение параметра FIC с увеличением длительности нахождения импланта в кости показывает постепенную остеоинтеграцию каждой из структур, но структура K показывает наилучшие результаты по параметру BIC (рис. 2), что говорит о высокой приживаемости импланта.

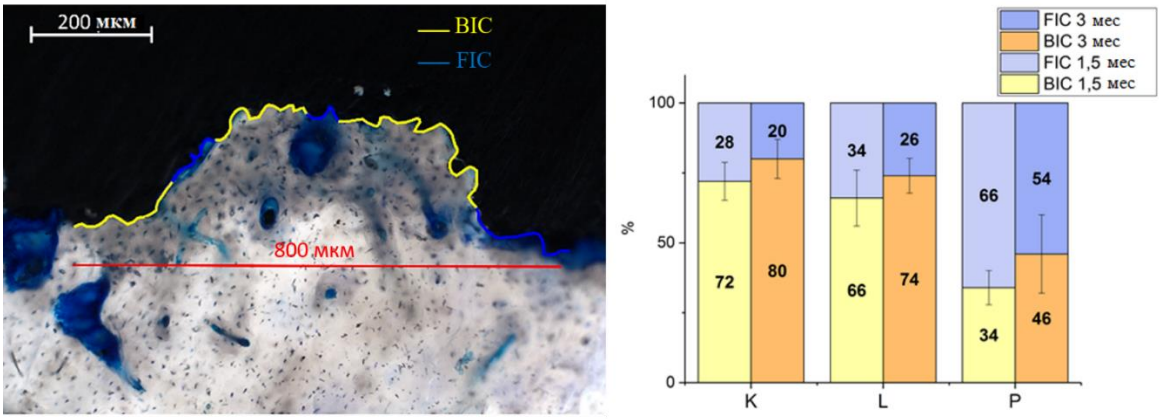


Рис. 2. Пример расчета (слева) и диаграмма параметров BIC и FIC (справа)

По увеличению числа и площади клеток на 3-х месячных образцах (рис. 3) можно предположить об уменьшении резорбционных участках на ткани вследствие образовавшейся реконструированной костной ткани (рис. 4). Все образцы показали хорошие результаты, что говорит о том, что импланты не цитотоксичны. Однако, стоит учитывать, время, которое затратит кость на укрепление костной ткани, ведь чем дольше кость будет находиться в ремодулированном состоянии, тем дольше она останется хрупкой и менее прочной. С данной точки зрения, структура К показывает наилучшие результаты, что говорит о том, что канавки являются более предпочтительными структурами. Данная структура является приближенной к естественной остеонной структуре костной ткани.

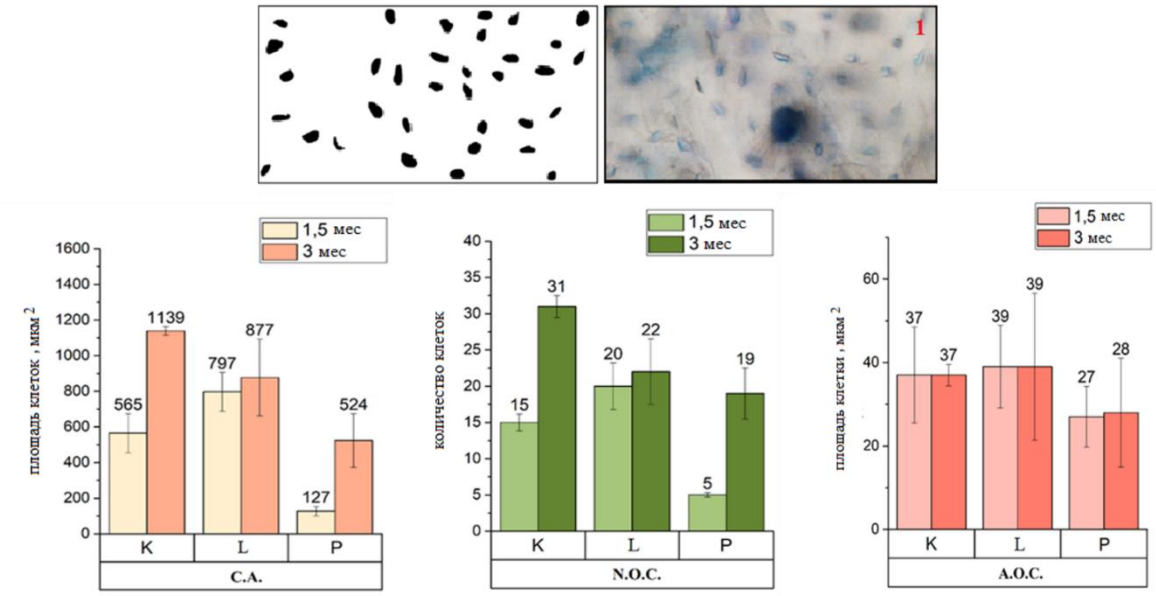


Рис. 3. Пример расчета и диаграммы параметров C.A., N.O.C. и A.O.C.

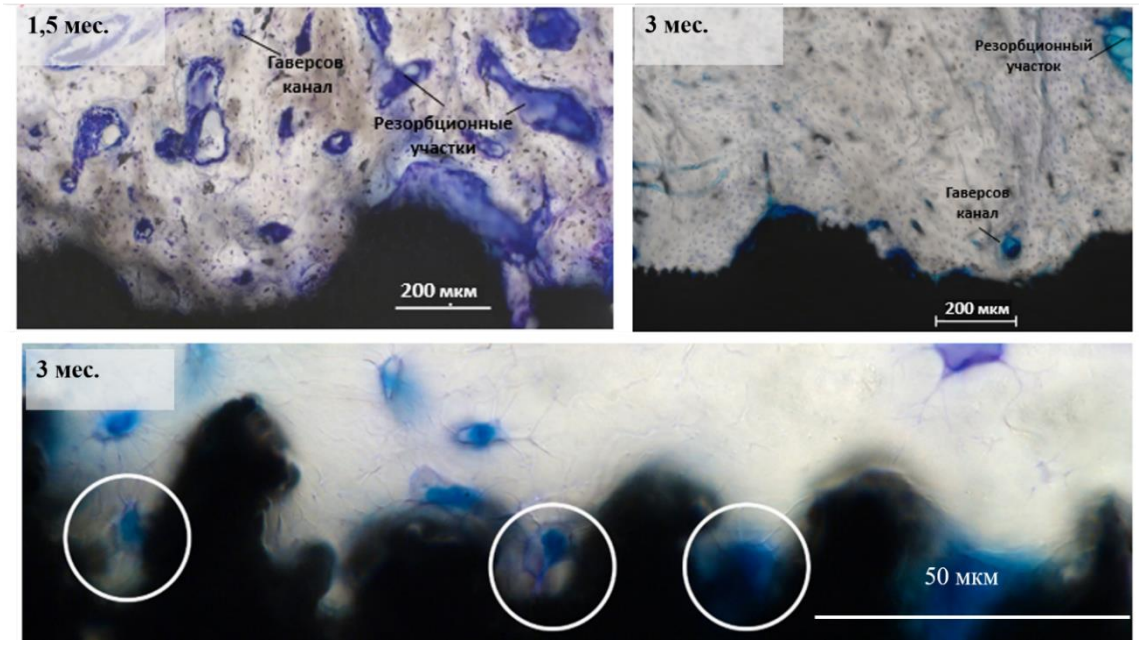


Рис. 4. Изображения костной ткани вблизи импланта, структурированного режимом К.
Процесс реконструирования костной ткани (сверху)
и единичные остеоциты в глубине канавок (снизу)

Вероятнее всего, импланты с разными структурами оказывают разное напряжение на кость, вызывая микроповреждения, что влияет на разную адаптацию клеток к меняющимся нагрузкам. Можно утверждать, что данные изменения приводят к ремодулирующим процессам ткани, что объясняет столь большой разброс размера клеток для каждой структуры. Однако, для 3-х месячной структуры К он значительно меньше в сравнении с остальными, что может говорить о законченных перестроичных процессах ткани, а значит и о прочности кости и устойчивости импланта. Также стоит отметить, что в структуре К в канавках присутствуют клетки остеоцитов (рис. 4), что подтверждает, что данная поверхность является наиболее благоприятной для устойчивого контакта кость-имплант.

Антибактериальная поверхность, по сравнению с биосовместимой, должна иметь более гладкую структуру с периодом в несколько раз меньшим самих бактерий, размер которых колеблется от 0,1 до 2 мкм [13]. Данная поверхность будет способствовать уменьшению бактериальной адгезии за счет уменьшения площади контакта. Также для улучшения антибактериальных свойств поверхность может обладать покрытием с антиадгезионными свойствами, например оксидом титана [14]. Благодаря воздействию лазерного излучения на воздухе титан окисляется, и на его поверхности образуется пленка из оксида. Во избежание возможного образования микрорельефа следует воздействовать на материал с плотностью мощностью, меньшей чем пороговая плотность испарения, но с достаточной для образования оксида (вблизи плотности мощности для процесса плавления). Основываясь на проведенных расчетах, были подобраны режимы с плотностью мощности $q = 11 \cdot 10^6$ Вт/см^2 и получены структуры с оксида титана в фазе рутил (структура R) и в фазе анатаз (структура А) – рис. 5.

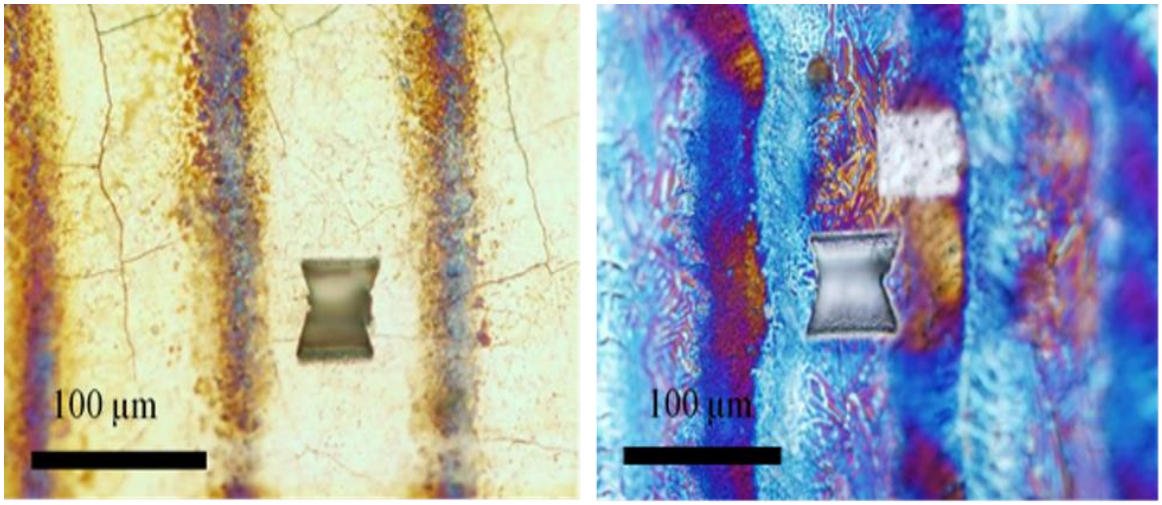


Рис. 5. Микрофотография с оптического микроскопа структуры R,
обработанной при $q = 11 \cdot 10^6$ Вт/см^2, V = 350 мм/с, f = 900 кГц (слева) и структуры А,
обработанной при $q = 11 \cdot 10^6$ Вт/см^2, V = 150 мм/с, f = 900 кГц (справа)

Далее для определения антибактериальных свойств был проведен эксперимент на исследование адгезии и образования биопленок. В данном эксперименте использовался штамм Streptococcus oralis ATCC 9811. Получено, что антибактериальные свойства рутила и необработанного титана схожи, однако анатаз проявляет лучшие антиадгезионные свойства и препятствует образованию биопленки по сравнению с остальными поверхностями (рис. 6).

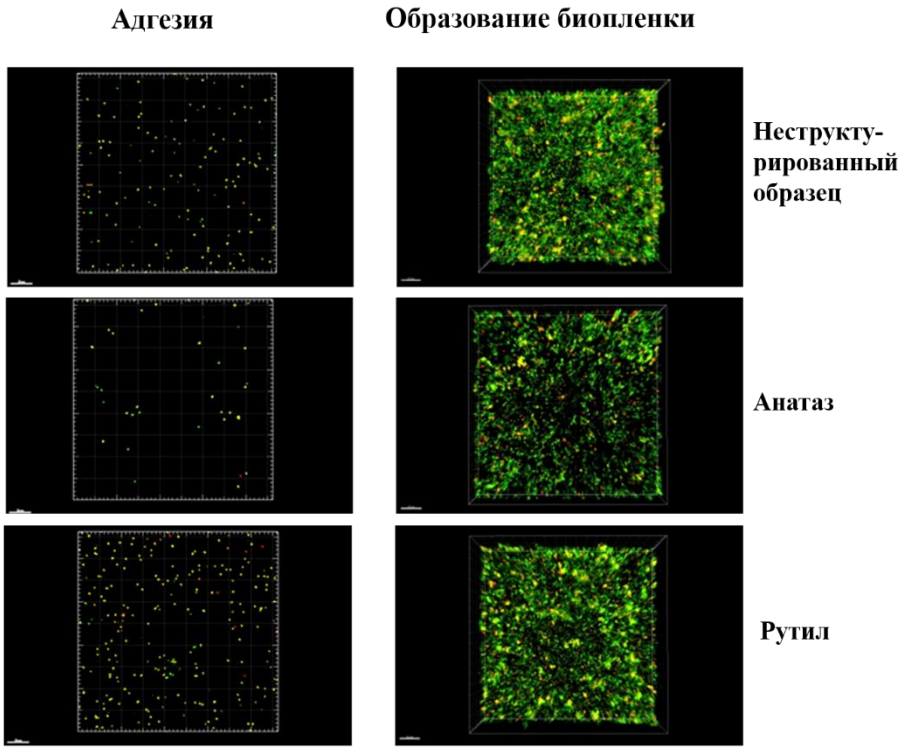


Рис. 6. Изображения, полученные с помощью конфокальной
лазерно-сканирующей микроскопии с 630-кратным увеличением,
через 5 часов после высадки бактерий (адгезия) и через 24 часа (биопленка)

В данной работе было исследовано влияние лазерно-индуцированных структур на поверхности титана на адгезию биологических объектов. В результате исследования были выявлены структуры с наилучшими биосовместимыми и антибактериальными свойствами: структура, имеющая рельеф в виде канавок и структура с оксидом титана в фазе анатаз. Однако режим лазерного воздействия, позволяющий обеспечить одновременно и биосовместимые, и антибактериальные свойства не был найден. Поэтому, в качестве альтернативного решения можно использовать комбинацию двух режимов воздействия для разных частей имплантата: обрабатывать абатмент и шейку импланта режимом А, а корень импланта – режимом К, т.к. именно на верхней части импланта, которая соприкасается с эпителиальной тканью, образуются бактериальные колонии, вызывающие переимплантит. Следующим этапом настоящего исследования будут эксперименты по определению биосовместимых свойств структуры А, клинические испытания структуры К, а также клинические испытания имплантата, структурированного комбинацией режимов А и К.

Литература

1. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / Илларионов А.Г., Попов А.А. // Демаков С. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2014. 137 с.
2. Макарова Э.Б., Захаров Ю.М., Руштейн А.П., Исайкин А.П. Интеграция костной ткани в пористые титановые импланты с алмазоподобными нанопокрытиями // Гений Ортопедии. 2011. №4. С. 111-116.
3. Karin Schwibbert, Friederike Menzel, Nadja Epperlein, Jörn Bonse, Jörg Krüger.Article.Bacterial Adhesion on Femtosecond Laser-Modified Polyethylene // Materials. 2019. №4. С. 1-10.

4. Jemat A., Ghazali M.J., Razali M., Otsuka Y. Surface Modifications and Their Effects on Titanium Dental Implants // Biomed Research. Int. 2015. P. 1-11.
5. Song H.-J. Surface characteristics and bioactivity of oxide films formed by anodic spark oxidation on titanium in different electrolytes. / Song H.-J., Park S.-H., Jeong S.-H., Park. // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209(2). P. 864-870.
6. Zwahr C., Günther D., Brinkmann T., Gulow N., Holthaus M.G., and Lasagni A.F. Laser Surface Pattering of Titanium for Improving the Biological Performance of Dental Implants // Advanced Healthcare Materials. 2017. Vol. 6(3). P. 1-9.
7. Kurella A., Dahotre N.B. Review paper: surface modification for bioimplants: the role of laser surface engineering //Journal of Biomaterials Applications. 2005. Vol. 20(5). P. 5-50.
8. Cunha A., Serro A. P., Oliveira V., Almeida A., Durrieu M.-C. Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti–6Al–4V surfaces // Applied Surface Science. Vol. 265. 2013. P. 688-696.
9. Cunha A., Zouani O. F., Plawinski L., Botelho do Rego A. M., Almeida A., Vilar R., Durrieu M.-C. Human mesenchymal stem cell behavior on femtosecond laser-textured Ti-6Al-4V surfaces // Nanomedicine. 2015. Vol. 10(5). P. 725-739.
10. Афанасьева Ю.И., Юрина Н.А., Котовский Е.Ф. Гистология, эмбриология, цитология. 6-е изд. Москва. ГЭОТАР-Медиа. 2016. 800 с.
11. Волков А.В., Бадалян В.А., Кулаков А.А., Бабиченко И.И., Капандзе Г.Д., Станкова Н.В. Гистоморфологические исследования взаимоотношений костной ткани с дентальным имплантатом // Биомедицина. 2012. № 4. С. 96–100.
12. Волков А.В., Смбатян Б.С., Назарян Д.Н., Мураев А.А. Новая морфометрическая Номенклатура для оценки остеоинтеграции внутрикостных имплантатов // СТМ. 2018. Том 10. № 3. С. 7–13.
13. Bhardwaj G., Webster T. Reduced bacterial growth and increased osteoblast proliferation on titanium with a nanophase TiO2 surface treatment // International Journal of Nanomedicine. 2017. Vol. 12. P. 363-369.
14. Dorkhan M., Hall J., Uvdal P., Sandell A., Svensäter G., Davies J. R. Crystalline anatase-rich titanium can reduce adherence of oral streptococci // Biofouling. 2014. Vol. 30(6). P. 751–759.

Ерёменко Анастасия Александровна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
студент группы № Т3450,
направление подготовки: 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,
e-mail: anastasiiayeremenko@gmail.com
Сергиенко Ольга Ивановна
Год рождения: 1957
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
к.т.н., доцент,
e-mail: oisergienko@itmo.ru

УДК 504.062

МЕТОДЫ И ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО СИМБИОЗА ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ

А.А. Ерёменко
Научный руководитель – к.т.н., доцент О.И. Сергиенко

Аннотация
В работе проанализированы существующие лучшие практики применения промышленного симбиоза для устойчивого управления отходами в странах Европы. Изучена эволюция понятия промышленный симбиоз, рассмотрены практические примеры создания симбиотических сетей, определены их преимущества. Исследованы возможности использования данной концепции для устойчивого управления отходами в Российской Федерации на примере МО «Сосновоборский городской округ» с целью максимального использования ресурсного потенциала отходов, улучшения экологической обстановки, достижения экономии и получения дополнительной финансовой прибыли.
Ключевые слова
Экономика замкнутого цикла, промышленный симбиоз, эффективное использование природных ресурсов, ресурсоэффективность, утилизация отходов.

Концепция экономики замкнутого цикла появилась в ответ на необходимость устойчивого развития в результате растущего давления на мировые ресурсы и окружающую среду. Экономика замкнутого цикла позволяет перейти от линейных к циклическим или замкнутым системам, способствуя экономии ресурсов и повышая их производительность на всех этапах производства, распределения и потребления. Центральными элементами экономики замкнутого цикла являются сокращение и переработка отходов. Промышленный симбиоз рассматривается как один из подходов к реализации экономики замкнутого цикла и достижения устойчивого «зеленого» роста. Идея, которая лежит в основе промышленного симбиоза, является метафорической интерпретацией принципов существования природной экосистемы, где ничто не пропадает даром, все приносит пользу. Можно предположить, что таким же образом отходы одного предприятия могут быть ресурсом для другого.

Промышленный симбиоз – использование отходов одного предприятия в производственном процессе другого предприятия – позволяет оптимизировать использование ресурсов, снижая экологические последствия путем замыкания ресурсных цепочек, тем самым способствуя развитию экономики замкнутого цикла. Промышленный симбиоз позволяет отдельным предприятиям объединить свои усилия, чтобы получить экологические и экономические выгоды, обмениваясь материалами, побочными продуктами, использованной водой, энергией. В результате создания взаимосвязанной сети, в которой энергия и материалы непрерывно циркулируют без образования отходов, в итоге сырье требуется в меньшей степени, потребность в свалках уменьшается, материалы дольше остаются экономически ценными.

Использование побочных продуктов не является новой практикой, в том числе и в Российской Федерации. Существуют отдельные примеры повторного использования сырья, воды, остаточной энергии. В ходе исследования были изучены работы российских и зарубежных авторов по вопросам экономики замкнутого цикла и промышленного симбиоза с целью формирования системы понятий. Был проанализирован практический опыт промышленного симбиоза в Финляндии, Швеции, России, использованы материалы, собранные в рамках международного проекта CREA-RE-RU «Экономика замкнутого цикла и эффективное использование природных ресурсов», основным фокусом которого являлось управление отходами в различных отраслях промышленности в странах–участницах проекта.

Анализ научных работ показал, что вопросы промышленного симбиоза в Российской Федерации мало освещены. Имеющиеся материалы недостаточно анализируют и не показывают наглядно потенциал промышленного симбиоза, его выгоды и преимущества. Все еще не выработан понятийный аппарат, отсутствует системный подход к выявлению потенциала развития промышленного симбиоза. Очевидна необходимость изучения вопросов «замыкания» циклов использования ресурсов, анализа существующих практик, оценки экологической и экономической эффективности процессов. Анализ успешных практик промышленного симбиоза в странах Европы показал, что одной из наиболее распространенных сфер применения промышленного симбиоза является сфера управления отходами. Этот опыт может быть успешно использован для обеспечения устойчивого управления отходами в России. Этим обусловливается выбор целей и задач исследования.

Цели и задачи исследования

Цель работы – анализ существующих лучших практик промышленного симбиоза для устойчивого управления отходами в странах Европы и демонстрация возможностей использования в Российской Федерации. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- изучение понятия промышленного симбиоза;
- выявление лучших практик применения промышленного симбиоза в странах Балтийского региона;
- демонстрация возможностей использования промышленного симбиоза для устойчивого управления отходами в российских реалиях на примере МО «Сосновоборский городской округ».

Методы и лучшие практики применения промышленного симбиоза

Промышленный симбиоз может рассматриваться как дисциплина промышленной экологии [1]. Идея промышленного симбиоза сформировалась на примере небольшого датского промышленного города Калуннборг, где на протяжении более 30 лет выстраивается сложная сеть обмена материалами, водой и энергией между участниками рынка и местным муниципалитетом. Отправной точкой развития

симбиоза Калуннборга стал дефицит подземных вод и поиск возможностей для использования поверхностных вод. Последние стали основной частью обменов, происходящих в сети, которая включает в себя несколько крупных заводов, в том числе завод по очистке сточных вод, нефтеперерабатывающий завод, заводы по производству ферментов и инсулина и электростанцию, работающую на угле. Эта сеть имеет и другие связи, начиная от рыбоводческого хозяйства до завода по производству биоэтанола.

Понятие промышленного симбиоза возникло на основе наблюдений за поведением подобных промышленных систем и интерпретации таких наблюдений. В качестве обобщения многолетнего опыта в изучении промышленного симбиоза можно привести определение Европейского комитета стандартизации CEN: “Промышленный симбиоз – это использование одной компанией или отраслью ресурсов, в широком смысле (в том числе отходов, побочных продуктов, остатков, энергии, воды, логистики, производственных мощностей, опыта, оборудования и материалов), недостаточно используемых другой, в результате чего ресурсы дольше используются в производственных процессах. Он представляет собой системный подход к более устойчивой и интегрированной промышленной экономике, позволяющий определять возможности для компаний по улучшению использования ресурсов и повышению производительности» [2].

Промышленный симбиоз не является застывшим понятием, это, скорее динамический процесс, характеризующийся непрерывной эволюцией с точки зрения участников сетевого взаимодействия, потоков, экономических и экологических результатов. Соответственно, это находит отражение и в расширении определения промышленного симбиоза. Сегодня важность географической близости для появления сетей промышленного симбиоза уже не имеет такого основополагающего значения, а типы обменов расширены и включают помимо материальных ресурсов обмен персоналом и знаниями.

Сегодня исследователи выделяют три основных типа обменов:

- повторное использование побочных продуктов (обмен специфическими материалами между двумя или более сторонами для использования в качестве заменителей коммерческих продуктов или сырья);
- совместное использование коммунальных услуг или инфраструктуры (объединенное использование и управление обычно используемыми ресурсами, такими как энергия, вода, электричество и тепло, а также совместная обработка выбросов);
- совместное предоставление услуг (удовлетворение общих потребностей различных предприятий в таких вспомогательных видах деятельности, как гашение пожаров, транспортировка и обеспечение продовольствием)».

Бурное развитие сферы экономики замкнутого цикла возродило интерес к промышленному симбиозу и использованию побочных продуктов отдельных предприятий. Традиционно понятие промышленного симбиоза относилось к процессам в промышленности, к обмену побочными продуктами или отходами между промышленными предприятиями или другими субъектами, в результате которого возникает взаимная выгода в таком обмене.

Не так давно была выявлена ценность городских систем, так называемый городской симбиоз. Точно так же, как промышленный, городской симбиоз стремится использовать возможности в городских районах или между промышленными и городскими функциями (остаточные городские потоки, системы отопления и охлаждения). Таким образом, если сотрудничество между предприятиями распространяется на городские районы, у обеих сторон есть потенциал для достижения экологических и экономических выгод и смягчения некоторых общих проблем. Это сотрудничество упоминается в нескольких публикациях как «урбанистический

симбиоз» или «промышленный и городской симбиоз» и имеет место, когда отходы, образующиеся в городских районах, используются в промышленности в качестве сырья или источника энергии, или когда промышленные предприятия предоставляют городским районам отработанное тепло в результате их эксплуатации» [3].

Основные преимущества промышленного симбиоза:

– экономические выгоды для предприятий, возникающие в результате экономии затрат на ресурсы и управления отходами, а также возможности получения доходов от более высокой стоимости побочных продуктов и потоков отходов;

– экологические выгоды за счет сокращения общих потребностей в ресурсах промышленной системы, повторного использования и рециркуляции потоков отходов и контроля загрязнения;

– другие выгоды для бизнеса, полученные в результате улучшения отношений с другими агентами и сообществом, экологического маркетинга, социальной корпоративной ответственности и создания новых возможностей для бизнеса и рынка;

– преимущества для сообщества как источника новой занятости, обеспечения существующих рабочих мест, улучшения местных экосистем или создания более чистой и безопасной окружающей среды.

Задача устойчивого промышленного роста и важность ресурсоэффективности признаны Европейской Комиссией и находят отражение в ее стратегии и политике. Подсчитано, что повышение эффективности использования ресурсов может привести к общей экономии в 630 млрд. евро в год для европейской промышленности [4]. Изменение экономических структур, обострение экологических проблем и повышение требований, связанных со спросом, означают, что компаниям необходимо находить более ресурсоемкие решения. Это может быть достигнуто путем сотрудничества компаний, работающих в различных секторах, а также с местными органами власти и муниципалитетами.

Применение промышленного симбиоза для устойчивого управления отходами в Российской Федерации

МО «Сосновоборский городской округ» выбран в качестве объекта исследования по внедрению инструментов промышленного симбиоза для устойчивого управления отходами с целью улучшения экологической обстановки, достижения экономии и получения дополнительной прибыли. В ходе работы были проанализированы и предложены два альтернативных варианта применения экологически более чистых технологий утилизации ТКО (твердых коммунальных отходов), которые направлены на максимально возможное использование ресурсного потенциала отходов. Данные технологии позволяют получить тепловую и электрическую энергию для использования в собственных нуждах, а также для продажи либо обмена с другими предприятиями. Результаты экономического анализа приведены в таблице.

Таблица

Сравнительный анализ показателей рентабельности

Показатель	Единица измерения	Обозначение	Значение (Проект 1)	Значение (Проект 2)
Общие инвестиции	тыс. руб.	I_0	286 400	550 000
Чистая годовая экономия	тыс. руб./год	B	98 798,92	135 708, 6
Срок окупаемости	лет	PB	3	4
Чистый дисконтированный доход	тыс. руб.	NPV	127 818,09	19 054,3

продолжение таблицы

Показатель	Единица измерения	Обозначение	Значение (Проект 1)	Значение (Проект 2)
Внутренняя норма рентабельности	%	IRR	25	21
Индекс доходности	–	PI	0,5	0,03

Сравнив оба проекта, сделан вывод, что в большей степени к внедрению рекомендуется первый вариант – станция сортировки и переработки отходов путем термического обезвреживания с получением жидкого топлива. Экономический анализ показал, что для внедрения технологии из первого проекта требуется меньше инвестиционных затрат, в отличие от второго – технологии газификации отходов на основе SRF-топлива (топливо из отходов), которая является менее прибыльной.

Расчеты проведены без учета прибыли от продажи вторсырья, в обоих случаях значения данного показателя приняты равными. В результате, оба проекта оказались недостаточно прибыльными, индекс доходности меньше единицы.

Альтернативой переработки отходов является полигонное захоронение отходов. Современная стоимость строительства полигона по сметным расчётам для МО «Сосновоборский городской округ» в ближайшие годы может составить 720 млн. рублей [5]. Если учитывать сэкономленные на строительство нового полигона средства, и первый, и второй проекты являются более выгодным и прибыльным решением.

Результаты исследования

Промышленный симбиоз способствует более устойчивому удовлетворению производственных и социальных потребностей за счет более рационального использования ресурсов, а также внедрения новых продуктов и услуг, которые являются более эффективными и действенными. Он также обладает значительным потенциалом повышения конкурентоспособности предприятий, снижения вредного воздействия на окружающую среду, а также устойчивого общественного развития. Тем самым, промышленный симбиоз является прагматичным и эффективным средством развития экономики замкнутого цикла.

Анализ успешных практик промышленного симбиоза показал, что большая часть симбиотических связей включает традиционные отрасли промышленности, такие как химическая и нефтехимическая промышленность, обработка металлов, целлюлозно-бумажная промышленность и другие. При этом использование остаточной энергии часто является общим элементом.

С другой стороны, одной из наиболее распространенных сфер применения промышленного симбиоза является сфера управления отходами. Этот опыт может быть успешно использован для обеспечения устойчивого управления отходами в России.

Многие десятилетия основным способом утилизации отходов и отработанных товаров в Российской Федерации являются полигоны твердых бытовых отходов, отвалы промышленных предприятий, отстойники. Однако это самый неэффективный способ обращения с отходами. Повторное использование, переработка и восстановление этих ресурсов может значительно снизить нагрузку на окружающую среду, в тоже время, позволяя предприятиям минимизировать затраты, удешевлять производство, повышать эффективность.

Такие возможности промышленного симбиоза были продемонстрированных на примере МО «Сосновоборский городской округ». В ходе работы были проанализированы альтернативные, более экологичные, технологии утилизации ТКО, позволяющие использовать их ресурсный потенциал повторно – сортировка и переработка отходов методом низкотемпературного пиролиза с получением жидкого

топлива, а также внедрение технологии утилизации отходов с получением твердого восстановленного топлива SRF и последующей газификацией в кипящем слое.

На основе результатов работы можно утверждать, что промышленный симбиоз является тем инструментом, который города могут использовать в качестве эффективного инструмента для решения проблем отходов. Для этого необходимо развивать промышленную переработку отходов, для чего наладить сортировку и подготовку вторсырья. На первом этапе развития промышленной переработки отходов целесообразно большую часть неутилизируемых материалов подвергать термической утилизации с полезным использованием энергии для собственных нужд, а также для продажи либо обмена с другими предприятиями.

Дальнейшее развитие симбиотической сети потребует тесного сотрудничества между различными отраслями данной территории, а также внедрения разнообразных синергетических проектов. Устанавливая связи между предприятиями и организациями сферы управления твердыми коммунальными отходами с другими отраслями промышленности, представленными на данной территории, можно будет получать новые симбиотические возможности на основе географической близости городских и промышленных территорий используя ресурсный потенциал ТКО для производственных нужд этих отраслей. Основными предпосылками для дальнейшего внедрения промышленного симбиоза в сферу управления отходами в Российской Федерации являются географическая близость предприятий, относительная открытость в обмене информацией и, по меньшей мере, заинтересованность в обмене материалами, энергией и другими ресурсами.

Литература

1. Jacobsen N.B. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects // Journal of Industrial Ecology. 2006. Vol. 10. No. 1-2. P.239–255.
2. Industrial Symbiosis: Core Elements and Implementation Approaches // CEN Workshop Agreement CWA 17354. 2018. P.7.
3. Ohnishi S., Dong H., Geng Y., Fujii M., Fujita T. A comprehensive evaluation on industrial & urban symbiosis by combining MFA, carbon footprint and emergy methods – Case of Kawasaki, Japan // Ecological Indicators. 2017. Vol. 73. P.513–524.
4. Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/circular-economy-communication.pdf (дата обращения 16.04.2020).
5. Суетинов В.П. Технический отчет по созданию территориальной схемы обращения с отходами в Сосновоборском муниципальном образовании. СПБ.: ЗАО “Безопасные технологии”. 2018. 27 с.

Кирилова Светлана Анатольевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
студент группы №К3420,
направление подготовки: 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
e-mail: Kirilova.Svetl.An@yandex.ru
Осипов Никита Алексеевич
Год рождения: 1972
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: nikita@ifmo.spb.ru

УДК 555.32

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕПЕТИЦИОННЫХ ЗАНЯТИЙ

С.А. Кирилова
Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.А. Осипов

Работа выполнена в рамках темы ВКР «Разработка информационно-аналитической системы организации репетиционных занятий».

Аннотация
В работе рассмотрен процесс проектирования и реализации системы организации репетиционных занятий с построением индивидуальной траекторией обучения. Проведен сравнительный анализ существующих платформ обучения, приводятся этапы проектирования приложения. Актуальность платформы заключается в использовании адаптивного компьютеризированного тестирования с целью получения точной оценки компетенций обучающегося. Разработка включает представленные базу данных, backend- и frontend-части приложения.
Ключевые слова
Информационная система, проектирование, разработка, индивидуальная траектория обучения, компьютеризированное адаптивное тестирование.

Введение

В настоящее время все больше людей уделяют внимание образованию, в том числе и самообразованию, как наиболее эффективному способу изучить желаемую дисциплину или профессию с наименьшим количеством затрат. Однако человек, вставший на путь освоения каких-либо навыков, может столкнуться с рядом трудностей. Далеко не каждый способен придерживаться строго графика, а также самостоятельно составлять корректные, целесообразные планы изучения дисциплины. Помимо этого, возникают проблемы самоконтроля и самопроверки, вследствие которых многие люди прекращают обучение, не видя результатов или не имя четкого дедлайна и расписания. В дополнение, поиск подходящих репетиторов и удобная организация общения с ними - еще один важный вопрос, волнующий обучающегося на начальных этапах.

Цель работы – разработать систему для организации репетиционных занятий, направленную на решение проблем связи и взаимодействия преподавателя и обучаемого, а также на корректное построение эффективного плана с индивидуальной траекторией обучения.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели:

– формирование четкого видения проекта и бизнес-процессов;
– реализация удобного интерфейса пользовательского взаимодействия;
– реализация общения посредством видеозвонков, текстовых сообщений и обмена файлами;
– разработка алгоритмов для составления учебных планов;
– реализация алгоритма тестирования для оценки степени освоения учебного материала.

1. Анализ существующих приложений для обучения

Вопрос самостоятельного обучения через Интернет давно уже не нов. Существует множество способов для домашнего изучения различных дисциплин, из которых самыми популярными являются иностранные языки и навыки IT-сферы такие как системное администрирование, программирование и т. д.

В работе проведен анализ нескольких из самых популярных платформ [1] для выявления необходимого функционала будущего разрабатываемого проекта, который будет учитывать сильные и слабые стороны каждого приложения. В качестве исследуемых платформ выбраны: GeekBrains, которая предоставляет курсы по изучению знаний IT-сферы; Skyeng, как платформа по изучению английского языка; Фоксфорд, нацеленный на организацию подготовки школьников к олимпиадам и экзаменам по школьной программе.

В результате анализа была составлена сравнительная таблица, представленная ниже.

Таблица

Сравнение аналогов разрабатываемого приложения

Наименование платформы	GeekBrains	Skyeng	Фоксфорд
Занятия с репетитором	Наличие консультанта по курсу	+	+
Наличие тестирования для определения уровня знаний	-	+	Неизвестно
Индивидуально нацеленная программа обучения	-	+	+
Календарь занятий	-	+	+
Анализ прогресса	-	+	Неизвестно

Таким образом, исходя из бизнес целей, важными функциями платформы являются тестирование, календарь занятий и функции взаимодействия с репетитором. Более близким аналогом разрабатываемого приложения является школа английского языка «Skyeng» которая имеет более развитые функции по работе с репетитором.

2. Проектирование

Ключевые функции, выполняемые Обучающимся в системе, представлены на диаграмме прецедентов (рис. 1):

На основе представленной диаграммы прецедентов составлены следующие функциональные требования:

Личный кабинет и авторизация. Система должна предоставлять доступ к личному кабинету путем авторизации пользователя по логину и паролю.

Составление плана обучения. Составление плана обучения на основе вводного тестирования. План формируется с учетом графика Обучающегося в виде календаря занятий.

Работа с календарем занятий. Календарь выводится на один месяц и включает информацию о проводимых занятиях.

Взаимодействие с репетитором. В случае работы с Репетитором таковой автоматически закрепляется за Обучающимся. Создается чат между двумя пользователями с возможностью загрузки медиа файлов и видео звонков. При неудовлетворении предоставляемых репетитором знаний, возможна функция смены репетитора.

Анализ прогресса. В личном кабинете Обучающегося представлен процент прогресса в каждой из изучаемых дисциплин и тем дисциплины отдельно. Прогресс высчитывается на основе тестов по теме, а также оценки Репетитора успехов Обучающегося.

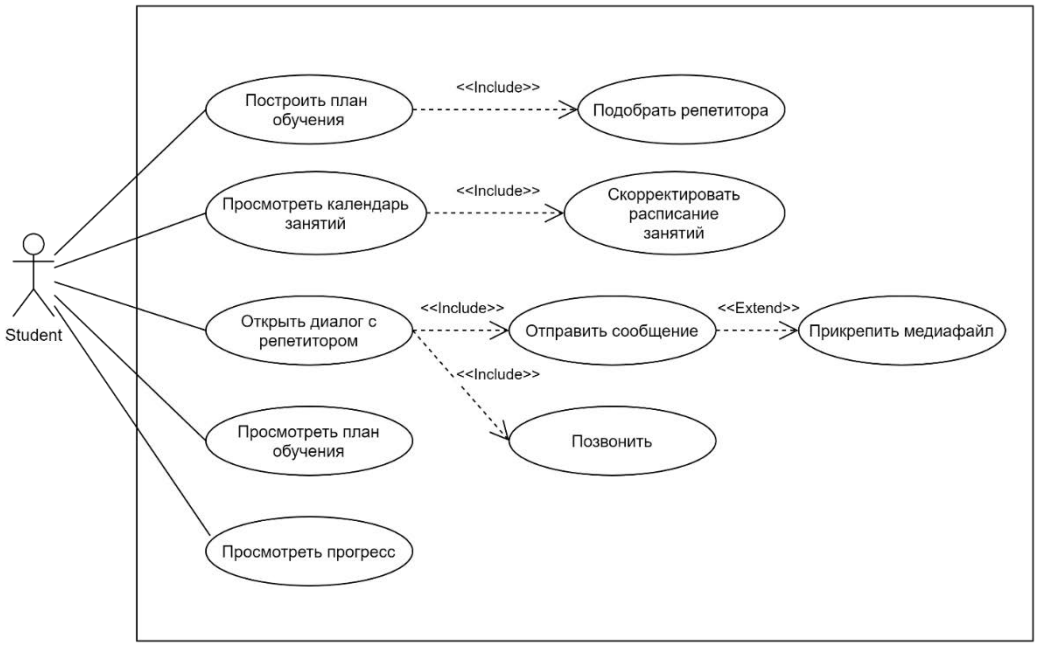


Рис. 1. Диаграмма прецедентов, Обучающийся

С точки зрения системной архитектуры, приложение реализует трехзвенную клиент-серверную архитектуру, которая обеспечивает необходимую горизонтальную масштабируемость, что дает постоянную производительность в обработке задач с растущим количеством клиентского трафика.

Для реализации платформы предлагается использование следующих технологий:

– HTML, CSS, JavaScript, Bootstrap для создания интерфейса пользователя;

– ASP.NET Core в качестве средства разработки функций уровня бизнес логики;

– Entity Framework Core в качестве технологии функций уровня доступа к данным;

– Microsoft SQL Server 19 в роли СУБД.

Таким образом, с учетом выбранных технологий для каждого компонента клиент-серверного приложения, архитектура разрабатываемого приложения выглядит согласно рис. 2.

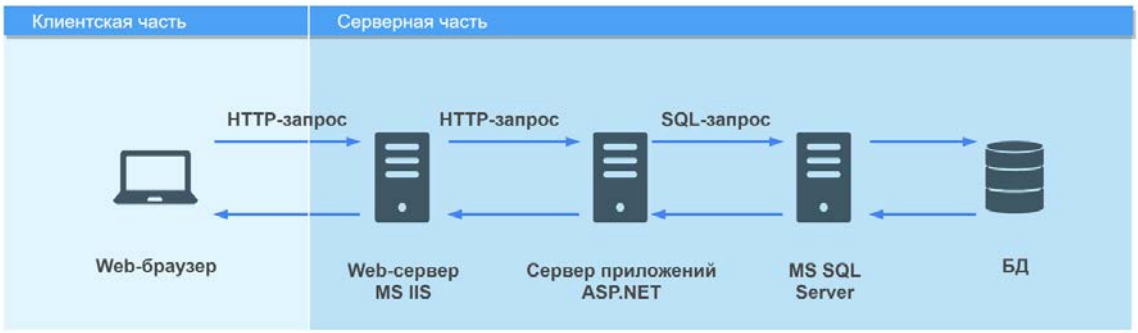


Рис. 2. Трехзвенная архитектура приложения

Разрабатываемая структура моделей показана на диаграмме классов моделей (рис. 3).

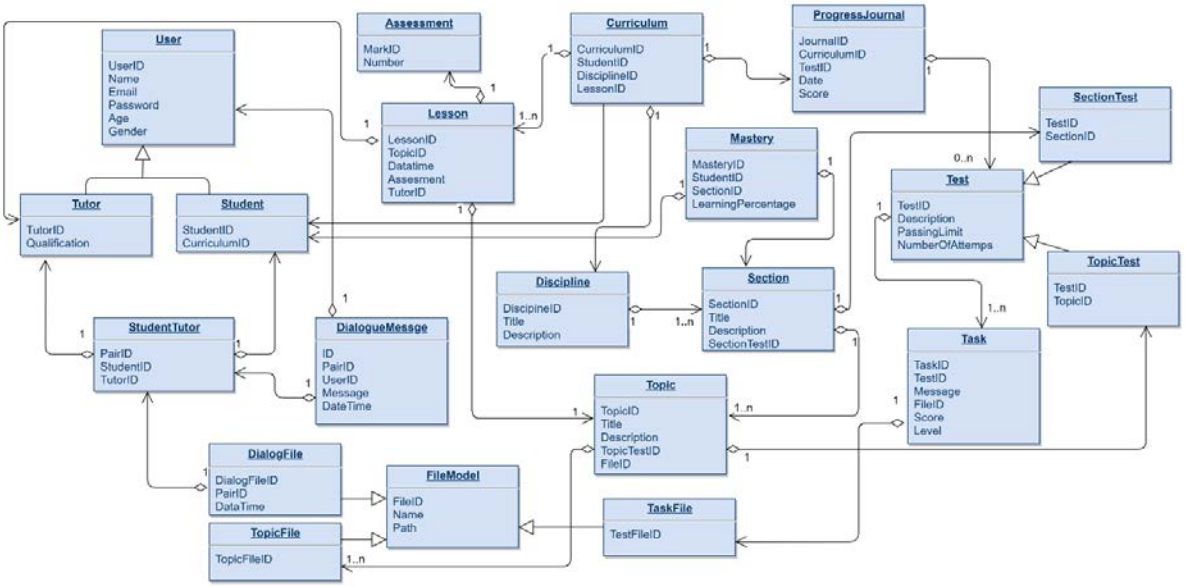


Рис. 3. Диаграмма классов моделей

Для решения задачи построения индивидуального плана обучения перед началом курса предлагается использование одного из видов компьютеризованного тестирования – компьютеризированного адаптивного тестирования (computerized adaptive testing - CAT) [2]. Главной отличительной особенностью указанного метода измерения знаний является адаптивность теста для каждого экзаменуемого. Данная адаптивность заключается в динамическом изменении хода тестирования в соответствии с рассчитываемой текущей оценкой уровня компетенций экзаменуемого на основе ответов на ранее пройденные вопросы.

С точки зрения проектирования, адаптивное тестирование состоит из пяти компонентов, часть которых итеративно повторяется до момента появления возможности конечного принятия решения о измеряемых способностях, в данном

случае – процентной оценки знаний по разделам дисциплины. Пять компонента CAT: Составление набора вопросов, Стартовая точка, Алгоритм выбора вопроса, Алгоритм оценивания, Критерий завершения. CAT работает, беря первые два компоненты за начальные данные, а далее итерационно перебирает пункты 3-5 до момента появления критерия завершения (рис. 4).

Рис. 4. Диаграмма действий (адаптированная схема Томпсона [3])

3. Реализация

В ходе реализации, на основе построенной диаграммы классов моделей данных посредством использования EF Core формируется следующая база данных TutoringPlatformDB (рис. 5):

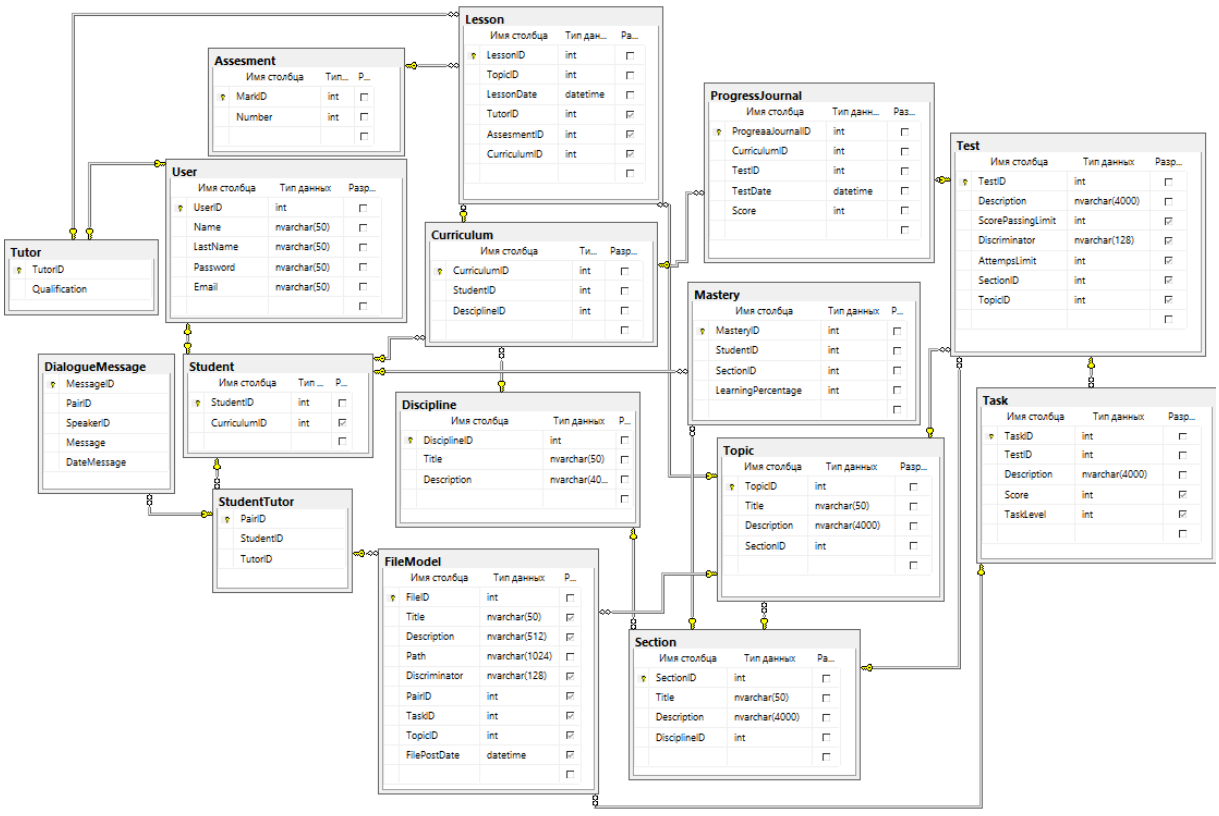


Рис. 5. Схема базы данных TutoringPlatformDB

Платформа включает функции аутентификация пользователей на основе куки, с использованием встроенной поддержки данной функции ASP.NET Core через компонент middleware, тестирования обучающегося, работы с учебными планами, обмена сообщениями, видеозвонками, где в качестве бесплатного медиа сервера

выбран Red5 [4], а передача видео- и аудиоданных осуществляется по протоколу RTMP.

Для удобного взаимодействия пользователя и системы, разработан интерфейс взаимодействия. Каждая страница содержит унифицированную панель меню, на которой расположены вкладки: Личная страница (информация пользователя), Диалоги (чаты с репетиторами), Календарь (расписание занятий), Курсы (планы обучения по дисциплинам), Тесты (рубежный контроль). В дополнение, разработано краткое руководство пользователя, которое поможет Обучающемуся в быстром освоении интерфейса и укажет последовательность шагов для начала обучения. Макет интерфейса пользователя представлен ниже на рис. 6.

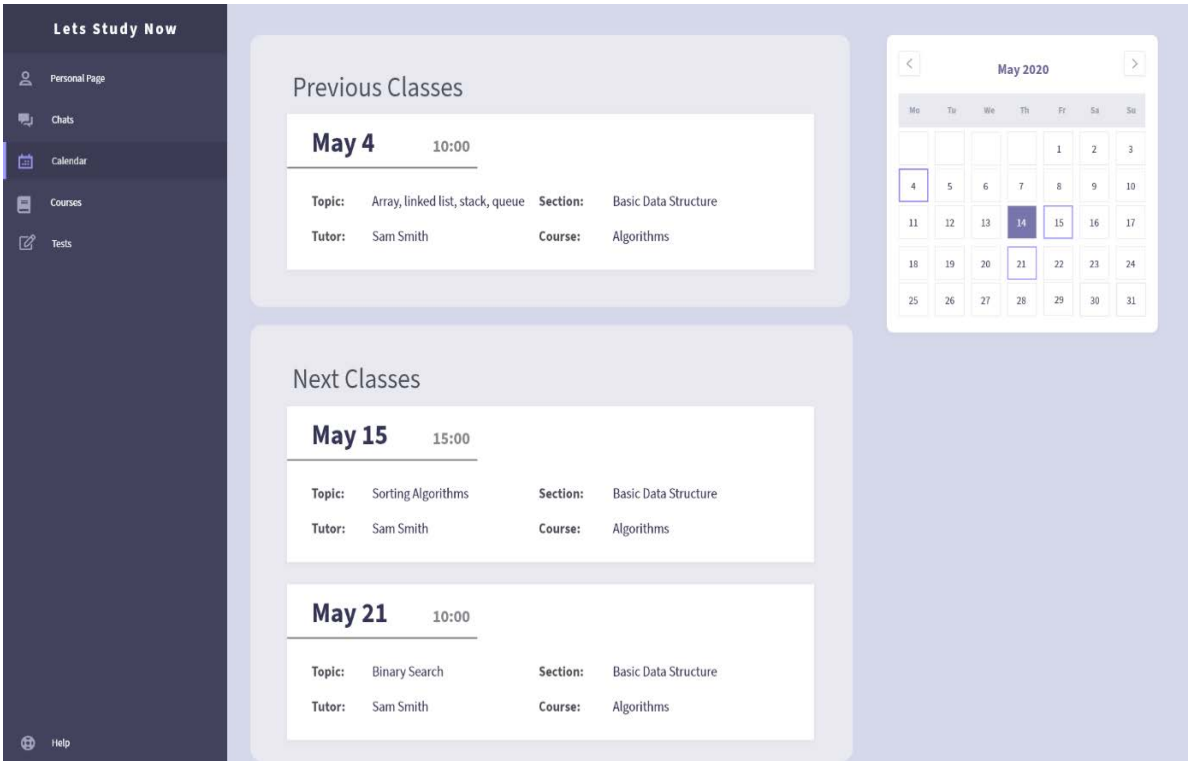


Рис. 6. Макет страницы расписания занятий

Заключение

В настоящей работе была достигнута поставленная цель, а именно реализация платформы для обучения с возможностью организации учебного процесса, как со стороны формирования расписания и составления индивидуальных траекторий обучения, так и удобного взаимодействия с репетитором.

Также, в ходе исследования были выполнены поставленные задачи: анализ образовательных онлайн-платформ, формирование целостного видения продукта, проектирование архитектуры приложения, программная разработка возможностей коммуникации через видеозвонки, обмен текстовыми сообщениями и файлами, а также алгоритмизация процессов тестирования и составления планов обучения.

Проект обладает высокой значимостью, как в рамках режима самоизоляции во время пандемии COVID-19, так и в будущем как система с удобной организации процесса обучения.

Дальнейшее развитие платформы – актуальная задача, осуществимая при внедрении новых технологий видеосвязи, повышении точности алгоритмов тестирования и формирования учебных планов, расширении функционала взаимодействия с репетиторами, работой с календарем расписания, а также добавлении

уведомлений о предстоящих занятиях. В продолжение развития платформы планируется внедрение дополнительных функций со стороны работы репетитора для измерения его нагрузки.

Литература

1. Соколова А. Звезды EdTech: 8 крутейших образовательных стартапов России [Электронный ресурс] // Rubase. Электрон. журн. 2017. Режим доступа: https://rb.ru/longread/edtech-stars/ (дата обращения: 18.06.2020).
2. International Association for Computerized Adaptive Testing [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.iacat.org/ (дата обращения: 18.06.2020).
3. Nathan Thompson, David Weiss. A Framework for the Development of Computerized Adaptive Tests // Assessment, Research & Evaluation. – 2011. – №16
4. RED5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.red5pro.com/open-source/ (дата обращения: 18.06.2020).

Крикун Александр Артемович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы №N3451,
направление подготовки: 10.03.01 – Организация и технология защиты информации,
e-mail: krikun98@gmail.com
Левина Алла Борисовна
Год рождения: 1983
Университет ИТМО,
факультет информационных технологий и программирования,
к.ф.-м.н. доцент,
e-mail: ablevina@itmo.ru

УДК 004.056.5

РАЗРАБОТКА МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ДИФФИ-ХЕЛЛМАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

А.А. Крикун
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент А.Б. Левина

Аннотация
В рамках работы была разработана модификация алгоритма Диффи-Хеллмана, позволяющая получить прирост производительности в 40% по сравнению со стандартной версией алгоритма. Также была реализована открытая библиотека для вычислений в конечных полях, которая включала как традиционные, так и оптимизированные алгоритмы возведения в степень по модулю. Были реализованы модификации алгоритма Диффи-Хеллмана, использующие алгоритмы возведения в степень «слева направо», Монтгомери и Монтгомери с использованием клеточных автоматов, были проведены сравнительные тесты производительности модификаций.
Ключевые слова
Алгоритм Диффи-Хеллмана, клеточные автоматы, криптография, обмен ключами, умножение Монтгомери.

Алгоритм обмена ключами Диффи-Хеллмана широко используется для защищённого обмена криптографическими ключами по открытому каналу. Алгоритм является основным в протоколе Secure Shell, популярной опцией в Transport Layer Security и других протоколах. С ростом вычислительных мощностей неизбежно растут и требования к длине криптографических ключей для обеспечения криптографической стойкости алгоритма. Для сохранения малого времени работы алгоритма, при условии увеличения длины криптографических ключей, необходимо ускорение работы алгоритма.

Алгоритм Диффи-Хеллмана основан на задаче возведения в степень по модулю. Эта задача – односторонняя функция: возведение в степень выполняется за полиномиальное время, в то время как для её обращения требуется решение задачи дискретного логарифмирования. Алгоритм может быть реализован на модульных группах или эллиптических кривых, но в данной работе рассматривается реализация на конечных полях, а конкретнее - конечных полях GF(2^k) Такие реализации очень хорошо

подходят для имплементации на электронных вычислительных машинах (ЭВМ), так как операции в этих полях переносятся на операции с битами памяти ЭВМ.

Для реализации алгоритма на конечных полях необходимо выбрать подходящий неприводимый многочлен, который можно считать аналогом модуля. Неприводимые многочлены должны отвечать множеству требований, например, широко используемые многочлены, предложенные в протоколе Oakley, являются простыми числами Софи Жермен, чтобы максимально противостоять атакам по типу алгоритма больших и малых шагов. Сложность нахождения подходящих многочленов привела к тому, что множество имплементаций следуют рекомендациям IETF (инженерного совета Интернета).

К сожалению, многие сервера поддерживают устаревшие стандарты для совместимости со старыми системами, либо из-за законов США об экспортной криптографии. Такие стандарты используют короткие неприводимые многочлены, и существуют методы, позволяющие с помощью предварительных вычислений сократить время решения задачи дискретного логарифмирования для конкретного многочлена на современных ЭВМ до сравнительно небольшого. Для повышения криптографической стойкости алгоритма необходимо использовать более длинные неприводимые многочлены, с помощью которых получаются более длинные ключи шифрования.

Работа с более длинными ключами шифрования требует больше вычислений и, соответственно, занимает больше времени. Но ускорение вычислений позволит увеличить криптографическую стойкость без потери скорости и комфорта пользователей.

Цель данной работы – рассмотрение, имплементация и сравнение производительности способов оптимизации алгоритма Диффи-Хеллмана, в частности с использованием алгоритма возведения в степень Монтгомери и его параллелизации с помощью клеточных автоматов.

Элементы конечного поля GF(2^k) можно представить как многочлены от степеней основания поля [4]:

$$a(x) \in GF(2^k) = \sum_{i=0}^{k-1} a_i x^i = a_{k-1}x^{k-1} + a_{k-2}x^{k-2} + \cdots + a_1 x + a_0$$

Для этого конечного поля также переопределены операции сложения (побитовое исключающее ИЛИ) и умножения (оно выполняется относительно неприводимого многочлена n(x)).

В качестве стандартного алгоритма быстрого возведения в степень в конечных полях использовался алгоритм «слева направо»:

Вход: $m(x), e, n(x)$
Выход: $c(x) = m(x)^e \ mod \ n(x)$
1: $c(x) \ = \ 1$
2: $for \ i = k - 1 \ to \ 0$
3: $\quad c(x) = c(x) \cdot c(x)$
4: $\quad if \ e_i \ == \ 1$: $c(x) \ = \ m(x) \ \cdot \ c(x)$

Арифметика Монтгомери позволяет создавать эффективные реализации алгоритмов умножения по модулю без непосредственного выполнения операции деления по модулю. Арифметика Монтгомери работает с альтернативным представлением чисел, которое называется представлением Монтгомери. Представим, что n – это положительное целое число длиной k бит, и зададим r и a как $r = 2^k$, НОД(n,r) = 1 и $0 \le a < r$, тогда перевод a в форму Монтгомери производится с помощью следующей формулы:

$$\overline{a} = a \cdot r \; mod \; n$$

Преимущество представления Монтгомери – это перенос математических операций из модуля *n* под модуль *r*. Так как *r* – это степень двойки, такой перенос качественно ускорит выполнение этих операций. Деления будут выполняться с помощью побитовых сдвигов, а операцию взятия модуля можно заменить побитовой маской.

Побитовые алгоритмы умножения Монтгомери используют только две операции - сдвиг на один бит вправо и побитовое исключающее ИЛИ. Обе команды выполняются через один процессорный вызов вместо нескольких последовательных и поэтому дают выигрыш в скорости. Для умножения Монтгомери (в дальнейшем в формулах как MMM) используется следующий алгоритм [1, 2]:

Вход: $\overline{a}(x), \overline{b}(x), n(x)$
Выход: $\overline{c} = c \cdot r \; mod \; n(x)$
1: $\overline{c}(x) = 0$
2: $for \; i = 0 \; to \; k - 1$
3: $\quad \overline{c}(x) = \overline{c}(x) + a_i b(x)$
4: $\quad \overline{c}(x) = \overline{c}(x) + \overline{c}_0 n(x)$
5: $\quad \overline{c}(x) = \overline{c}(x)/x$

Такое умножение проводится с числами в форме Монтгомери. Для перевода в форму Монтгомери можно использовать умножение Монтгомери на $r(x)^2$, а для перевода обратно - на единицу.

Необходимость перевода чисел в представление Монтгомери и обратно даёт некоторые дополнительные затраты времени, за счёт которых одно умножение Монтгомери выполняется медленнее обычного. Но в случаях выполнения множества последовательных умножений представление Монтгомери даёт значительный прирост в скорости операций. Важный для данной работы случай последовательных умножений – это возведение в степень. В форме Монтгомери оно производится по следующему алгоритму [3]:

Вход: $m(x), e, n(x), r^2 = r(x) \cdot r(x) \; mod \; n(x)$
Выход: $c(x) = m(x)^e \; mod \; n(x)$
1: $\overline{m}(x) = \text{MMM}(m(x), r^2)$
2: $\overline{c}(x) = \text{MMM}(1, r^2)$
3: $for \; i \; = \; 0 \; to \; k - 1$
4: $\quad if e_i == 1: \overline{c}(x) = \text{MMM}\big(\overline{m}(x), \overline{c}(x)\big)$
5: $\quad \overline{m}(x) = \text{MMM}\big(\overline{m}(x), \overline{m}(x)\big)$
6: $c(x) = \text{MMM}(\overline{c}(x), 1)$

Алгоритм возведения в степень Монтгомери даёт значительный выигрыш в скорости по сравнению со стандартным алгоритмом «слева направо». Похожий алгоритм используется в OpenSSL, самой популярной открытой библиотеке для криптографии. Он также использовался при тестировании производительности, проведённом в данной работе.

В алгоритме возведения в степень Монтгомери на шагах 4 и 5 в вычислении двух значений *m(x)* и *c(x)* существует общий шаг – умножение на мультипликативно обратное к *r*:

$$\text{MMM}\big(\overline{m}(x), \overline{c}(x)\big) = \overline{m}(x)\overline{c}(x)r^{-1} \; mod \; n(x)$$

$$\text{MMM}\big(\overline{m}(x), \overline{m}(x)\big) = \overline{m}(x)\overline{m}(x)r^{-1} mod \; n(x)$$

Вычисление значения $\overline{\mathrm{m}}(\mathrm{x})\mathrm{r}^{-1}$ единожды и параллельное вычисление квадрата и произведения позволяет значительно ускорить выполнение алгоритма возведения в степень (MMMS) [1]:

Вход: $\overline{m}(x), \overline{c}(x), n(x)$

Выход: $M(x) = \mathrm{MMM}\left(\overline{m}(x), \overline{c}(x)\right), S(x) = \mathrm{MMM}\left(\overline{m}(x), \overline{m}(x)\right)$

1: $t(x) = \overline{m}(x)$

2: $M(x) = 0, S(x) = 0$

3: $for\ i\ =\ k-1\ to\ 0$

4: $\quad t(x) = \left(t(x) + t_0 n(x)\right)/x$

5: $\quad M(x) = M(x) + t(x)\overline{c}_i, S(x) = S(x) + t(x)\overline{m}_i$

На шаге 4 в алгоритме для деления на *x* используется операция побитового сдвига вправо. Такая операция может быть описана и реализована с помощью элементарного клеточного автомата 240 (рис. 1). Этот алгоритм параллельного возведения в квадрат и перемножения с помощью клеточных автоматов позволяет создать оптимизированную версию алгоритма возведения в степень Монтгомери:

Вход: $m(x), e, n(x), r^2 = r(x) \cdot r(x)\ mod\ n(x)$

Выход: $c(x) = m(x)^e\ mod\ n(x)$

1: $\overline{m}(x) = \mathrm{MMM}(m(x), r^2)$

2: $\overline{c}(x) = \mathrm{MMM}(1, r^2)$

3: $for\ i\ =\ 0\ to\ k-1$

4: $\quad if e_i == 1: \left(\overline{c}(x), \overline{m}(x)\right) = \mathrm{MMMS}\left(\overline{m}(x), \overline{c}(x)\right)$

5: $\quad else: \overline{m}(x) = \mathrm{MMM}\left(\overline{m}(x), \overline{m}(x)\right)$

6: $c(x) = \mathrm{MMM}(\overline{c}(x), 1)$

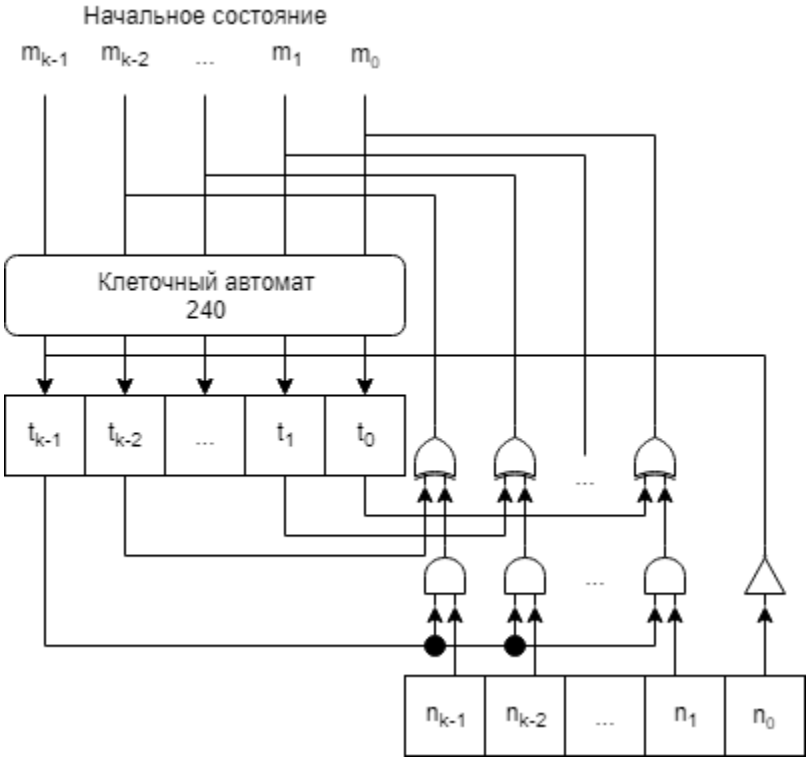


Рис. 1. Вычисление $\mathrm{t(x)} = \left(\mathrm{t(x)} + \mathrm{t_0 n(x)}\right)/\mathrm{x}$ с помощью клеточного автомата 240

Эта версия получает значительный выигрыш в скорости на единицах в степени, так как вместо двух умножений Монтгомери выполняется одна параллельная операция.

Для сравнительного тестирования производительности была разработана библиотека для арифметики в конечных полях на языке Python. В библиотеке было реализовано три варианта алгоритмов возведения в степень в конечных полях (1, 2, 3), с использованием которых были реализованы различные модификации алгоритма Диффи-Хеллмана. Неприводимые многочлены брались из рекомендаций RFC: 2412, 3526 и 7919. В тестирование включены многочлены в 768, 1024 и 1536 бит, которые сравнительно недавно объявили «не рекомендуемыми» [5]. Это позволяет понять, какого изменения в скорости работы стоит ожидать при переходе на многочлены, рекомендованные последними стандартами. Также это позволяет показать, что серьёзных потерь в скорости можно избежать с помощью использования оптимизации, рассматриваемой в работе. Тестирование производилось на ЭВМ с процессором AMD Threadripper 3960X с 24 ядрами и тактовой частотой 3.8-4.2 гигагерц.

Для тестирования производительности модификаций алгоритма Диффи-Хеллмана проводился полный набор операций, необходимый для получения секретного ключа по алгоритму Диффи-Хеллмана. Выбиралось два случайных числа $a, b: r(x)/x^2 \leq a, b < r(x)/x$ и вычислялись открытые ключи и дважды – секретный ключ: $g^a, g^b, (g^a)^b, (g^b)^a$. Генератор $g = 2$ также был взят из рекомендаций IETF. Было произведено 60 циклов тестирования. Результат представлен на рис. 2.

Как видно из графика, даже стандартный алгоритм Монтгомери даёт преимущество около 20%, а оптимизированная с помощью клеточных автоматов модификация алгоритма Монтгомери позволяет получить прирост в скорости работы до 40%.

Оптимизированная с помощью клеточных автоматов модификация алгоритма Диффи-Хеллмана позволяет увеличить длину ключей с, например, более непригодных 1536 бит до рекомендуемых 2048 бит без увеличения времени работы при замене модификации алгоритма Диффи-Хеллмана, основанной на стандартном алгоритме возведения в степень.

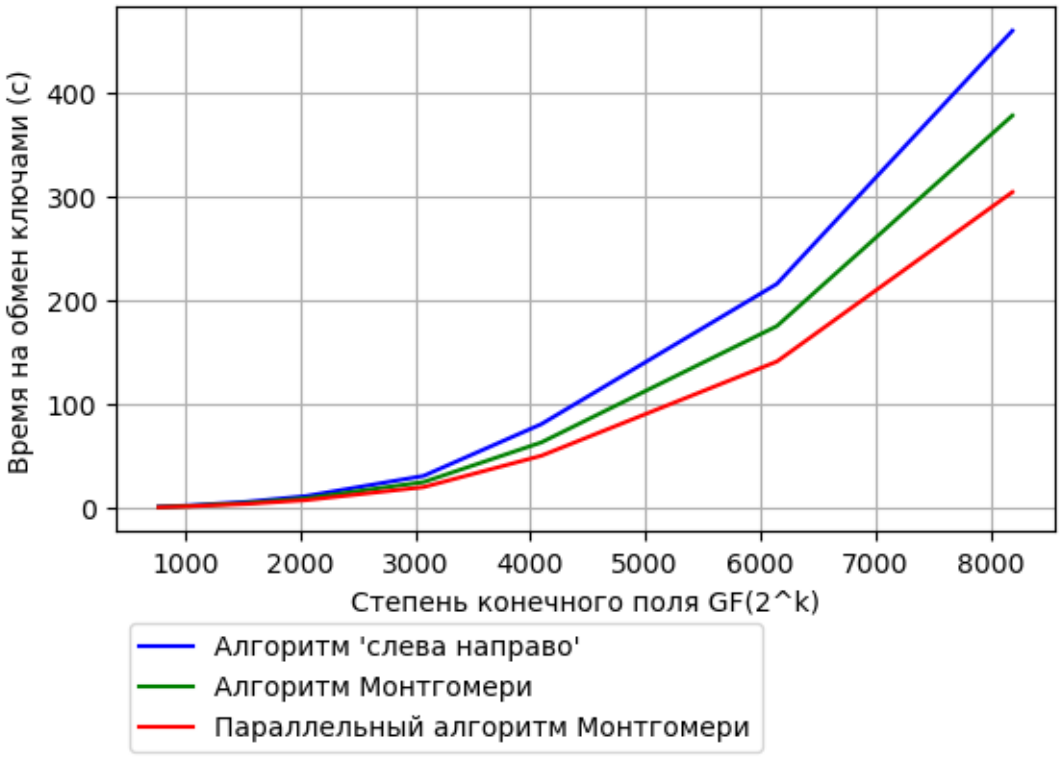


Рис. 2. Сравнение производительности для полного алгоритма Диффи-Хеллмана

Разработанная в ходе данной работы модификация алгоритма Диффи-Хеллмана с использованием клеточных автоматов. может быть использована для ускорения процесса обмена ключами до 40% или для увеличения безопасности последующего шифрования с помощью удлинения ключей без значительного замедления. Модификация может быть реализована как программно, так и аппаратно с помощью логических схем на основе клеточных автоматов.

Для тестирования разработанной модификации была создана открытая библиотека для арифметики в конечных полях на языке Python. Данная библиотека может быть использована как пример для «перевода» и последующего включения модификации в состав широко используемых криптографических пакетов, например, OpenSSL и основанного на нём OpenSSH.

Подобные модификации могут быть разработаны для других алгоритмов на основе операции возведения в степень в конечных полях, например, для схемы Эль-Гамаля. Также следует исследовать возможность реализации подобных модификаций для представлений Монтгомери на эллиптических кривых.

Литература

1. Ku K., Ha K., Yoo W., and Yoo K., Parallel Montgomery multiplication and squaring over GF(2^m) Based on cellular automata – Proc. ICCSA 2004. (LNCS, 3046). pp. 196-205. 2004.
2. Koç Ç.K., Acar T., Montgomery Multiplication in GF(2^k) – Kluwer Academic Publishers, Designs, Codes and Cryptography. 14(1). pp. 57-69. April 1998.
3. Koç Ç.K., Acar T., Fast software exponentiation in GF(2^k) – In Proceedings, 9th Symposium on Computer Arithmetic, pp. 225–231. Asilomar. California. July 6–9. 1997.
4. Menezes A, Oorschot PV, Vanstone S., Handbook of applied cryptography – CRC, Boca Raton, 1997.
5. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. 08/2018. DOI: 10.17487/RFC8446. URL: https://rfceditor.org/rfc/rfc8446.txt. RFC 8446. (дата обращения: 01.04.2020).

Матюшкина Анна Андреевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы №V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика,
e-mail: anyuta.matyushkina@mail.ru
Орлова Анна Олеговна
Год рождения: 1973
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
д.ф-м.н., доцент,
e-mail: a.o.orlova@gmail.com

УДК 546.05, 546.06

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИТО-ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОКОМПОЗИТОВ

А.А. Матюшкина
Научный руководитель – д.ф.-м.н., доцент А.О. Орлова

Аннотация
Магнито-люминесцирующие материалы, изначально не существующие в природе, могут найти многочисленные применения в экологической и биомедицинской областях. В данной работе синтезированы и исследованы магнито-люминесцирующие нанокомпозиты, состоящие из суперпарамагнитной наночастицы магнетита (SPION), покрытой люминесцирующей оболочкой CdSe и пассивирующим слоем ZnS.
Ключевые слова
Квантоворазмерные нанокристаллы, магнитный круговой дихроизм, магнито-люминесцирующие нанокомпозиты, суперпарамагнитные наночастицы магнетита, фотолюминесценция.

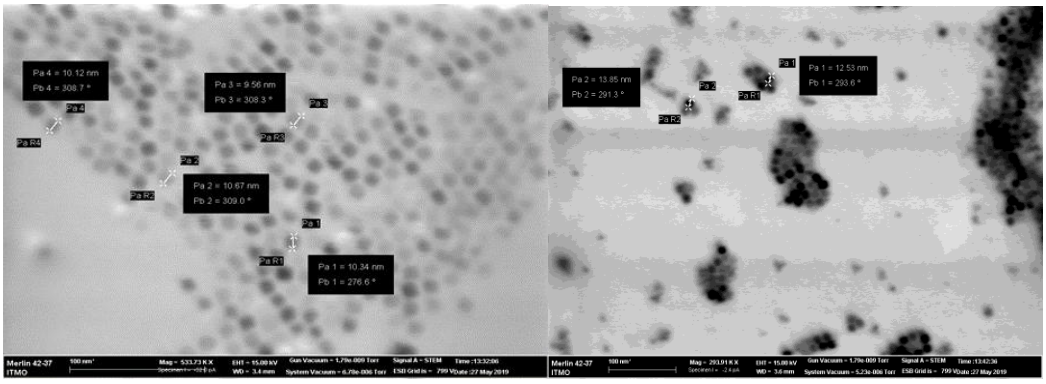
Активные исследования ведутся по созданию структур, которые одновременно бы обладали яркой люминесценцией и магнитными свойствами. Люминесцентная часть таких систем может служить для визуализации и отслеживания движения нанокомпозитов. Магнитная составляющая позволяет контролировать адресную доставку, а также может быть агентом гипертермии и магнитно-резонансной томографии. В природе не существует материалов, которые одновременно характеризуются высоким квантовым выходом люминесценции и высокой степенью намагниченности. Именно поэтому подход к созданию такого материала, который заключается в использовании люминесцирующих и магнитных компонент в одной структуре, является актуальной задачей современных исследований наноструктур. Такие магнитно-люминесцирующие системы могут найти многочисленные применения в экологической и биомедицинской областях, в частности, в качестве сенсоров, доставщиков лекарственных препаратов, для осуществления контроля состояния окружающей среды и при применении физических методов тераностики заболеваний [1].

Сложно однозначно сделать вывод, какая магнито-люминесцирующая система более эффективна – собранная из заранее синтезированных частиц или полученная путем наращивания оболочки с одними свойствами на ядро, обладающее другими.

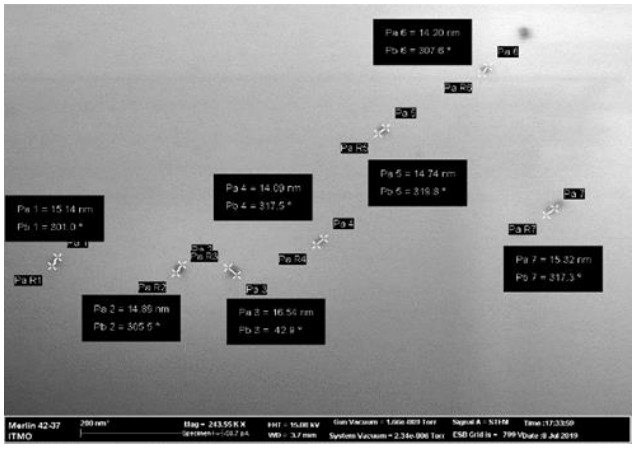
Однако квантовый выход люминесценции магнито-люминесцирующих систем либо не упоминается в статьях, либо оказывается низким 2-3%. Особый интерес представляет способ создания такой системы путем последовательного наращивания оболочек CdSe и ZnS на магнитную наночастицу Fe_3O_4 [2]. За счет слоя ZnS квантовый выход люминесценции магнито-люминесцентных комплексов увеличился с 2-3% до 10-15%, что связано с уменьшением количества дефектов в слое CdSe.

Характеризация нанокомпозитов

Изображение, полученное методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) (рис. 1а), показывает, что SPIONs находятся в образце в монодисперсном состоянии и их средний размер составляет 10 нм. После наращивания оболочки CdSe средний размер нанокомпозитов SPION/CdSe (рис. 1б) увеличился до 13 нм, и их форма изменилась от кубической до сферической. На рис. 1б также наблюдаются более мелкие частицы со средним размером около 3 нм, которые, вероятно, соответствуют свободным квантовым точкам CdSe, образующимся отдельно в растворе в процессе синтеза. Образец очистили от свободных квантовых точек CdSe путем выделения нанокомпозитов из раствора с помощью постоянного внешнего магнитного поля. Далее, после роста оболочки ZnS размер нанокомпозитов SPION/CdSe/ZnS (рис. 1в) увеличился примерно до 15 нм. Кроме того, на рис. 1в не наблюдается более мелких частиц, что может указывать на отсутствие свободных квантовых точек в образце.



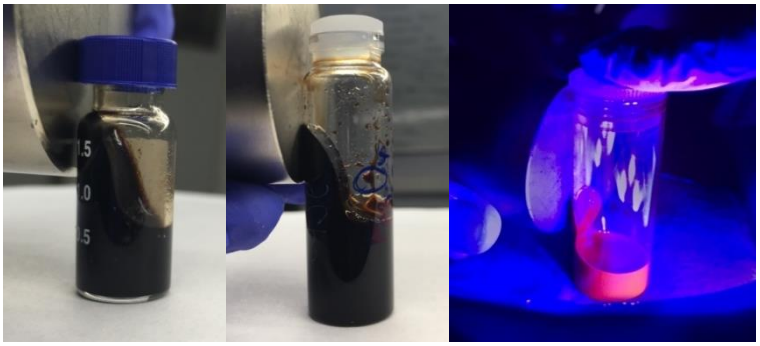
а б



в

Рис. 1. SEM-изображения нанокомпозитов: а) SPIONs, б) SPION/CdSe, в) SPION/CdSe/ZnS

Полученные нанокомпозиты проявляют способность намагничиваться в постоянном внешнем магнитном поле на каждом этапе синтеза, а также обладают люминесцентными свойствами (рис. 2).



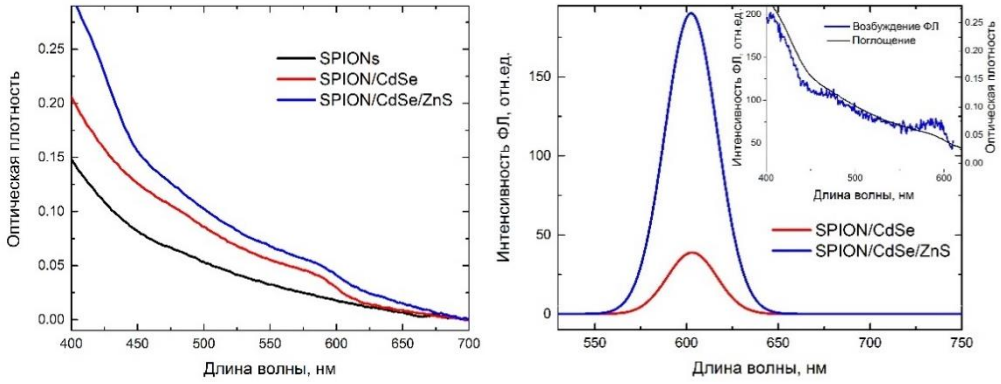
а б в

Рис. 2. Фото растворов нанокомпозитов во внешнем магнитном поле:
а) SPIONs, б) SPION/CdSe, в) SPION/CdSe/ZnS

Спектрально-люминесцентные свойства нанокомпозитов

В данной работе мы предполагаем, что оптические свойства полупроводниковых сферических слоев аналогичны свойствам квантовых точек (КТ). После наращивания полупроводниковой оболочки CdSe в спектрах поглощения (рис. 3а) образцов с SPION/CdSe и SPION/CdSe/ZnS наблюдается экситонный пик на длине волны 585 нм. Следует отметить, что по данным SEM средняя толщина сферического слоя в нанокомпозитах SPION/CdSe составляет 1,5 нм. Эффективная ширина запрещенной зоны оболочки CdSe толщиной 1,5 нм оказывается на 1 эВ меньше, чем в случае квантовых точек CdSe диаметром 1,5 нм, и соответствует 2,1 эВ. Таким образом, получается, что край полосы фундаментального поглощения наноразмерного слоя CdSe сдвинут в область меньших энергий по сравнению с КТ такого же диаметра, как толщина сферического слоя.

Спектры люминесценции (рис. 3б) нанокомпозитов демонстрируют симметричную полосу фотолюминесценции (ФЛ) с полушириной 32 нм и максимумом на длине волны 603 нм. Рост пассивирующей оболочки ZnS привел к увеличению интенсивности люминесценции. Спектр возбуждения ФЛ нанокомпозитов соответствует по форме их спектру поглощения (рис. 3б) и подтверждает наличие экситонного пика на длине волны 585 нм.



а б

Рис. 3. Спектры поглощения (а), ФЛ ($\lambda_{возбуждения}$ = 450 нм) и возбуждения ФЛ ($\lambda_{регистрации}$ = 620 нм) (б) образцов

Относительный квантовый выход люминесценции нанокомпозитов, оцененный по стационарным спектрам люминесценции, рассчитывался по формуле:

$$\varphi_{отн} = \varphi_R \frac{I \cdot D_R \cdot n^2}{D \cdot I_R \cdot {n_R}^2} \quad (1)$$

В качестве референтного образца выступал раствор органического люминофора родамина 6Ж в этаноле. Квантовый выход ФЛ составил ~0,5% и ~2% для нанокомпозитов SPION/CdSe и SPION/CdSe/ZnS, соответственно.

Увеличение квантового выхода ФЛ в 4 раза после наращивания пассивирующей оболочки ZnS показывает успешное уменьшение поверхностных дефектов слоя CdSe. Однако столь невысокий квантовый выход ФЛ, в сравнении с данными, приведенными в статье [2], в которой исследовались аналогичные нанокомпозиты, видимо, связан с плохим качеством синтезированной люминесцирующей оболочки CdSe. Представленные данные вместе с информацией о размере наночастиц позволяют предположить успешное наращивание полупроводниковых оболочек CdSe и ZnS на магнитное SPION-ядро.

Также были зарегистрированы кривые затухания ФЛ нанокомпозитов SPION/CdSe/ZnS без фильтров и с использованием фильтров с максимумами полосы пропускания на длинах волн 590, 600 и 615 нм. Длина волны регистрации люминесценции выбиралась в максимуме спектра ФЛ и в более коротковолновой и длинноволновой частях спектра ФЛ нанокомпозитов для снятия спектра с разных размерных фракций люминесцирующих слоев.

Анализ кинетики ФЛ нанокомпозитов показал, что экситонная ФЛ наноразмерного слоя CdSe характеризуется трехэкспоненциальным затуханием, аппроксимированным формулой (2), с характерными временами затухания и амплитудами люминесценции, приведенными в таблице.

$$I = A_0 + A_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + A_3 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (2)$$

Таблица

Времена затухания и амплитуды люминесценции нанокомпозитов

Максимум полосы пропускания фильтра, нм	<τ>, нс	τ_1, нс	A_1, %	τ_2, нс	A_2, %	τ_3, нс	A_3, %
без фильтра	11,5±1,2	20,0±0,6	8,9±0,4	3,8±0,2	32,5±1,6	0,9±0,1	58,6±0,9
590	13,2±1,3	21,0±1,0	10,8±0,7	3,7±0,2	35,2±1,1	0,8±0,1	54,0±0,9
600	11,5±1,2	20,0±0,7	9,9±0,5	4,0±0,2	37,0±2,1	1,0±0,1	53,1±1,5
615	13,5±1,4	21,0±1,6	11,8±1,1	4,1±0,5	34,3±2,9	0,8±0,1	53,9±2,9

Из таблицы видно, что времена затухания ФЛ не зависят от длины волны регистрации в пределах погрешности, что означает отсутствие переноса энергии между нанокомпозитами, то есть отсутствие их агрегации.

Квантовый выход люминесценции связан с характерным временем затухания согласно формуле:

$$\varphi = \frac{\tau}{\tau_r} \quad (3)$$

Для CdSe τ_r = 25 нс [3], из чего получаем средний квантовый выход φ = 46%. Далее осуществлялся расчет доли «темной» фракции по формуле:

$$\varphi_{отн} = (1 - n_{dark}) \cdot \varphi(\tau) \quad (4)$$

Оцененная доля «темной» фракции в ансамбле нанокомпозитов составляет около 95,7%. Причиной значительной доли «темной» фракции может являться повышение скорости безызлучательной релаксации за счет переноса энергии от слоя CdSe к магнитному SPION-ядру, что характерно для магнито-люминесцирующих систем.

Магнитооптические свойства нанокомпозитов

Феномен магнитного кругового дихроизма (МКД) представляет собой различную способность к поглощению веществом в магнитном поле света с правой и левой круговой поляризацией. В статье [4] зависимости нормированной интенсивности полос спектра МКД от величины и знака внешнего магнитного поля повторяет кривую намагничивания образца. Это означает, что интенсивность спектров МКД отражает данные о намагниченности образца. Этот факт делает спектроскопию МКД эффективным методом оценки магнитных свойств образцов.

Положение полос МКД образца SPIONs согласуется с энергетическими переходами, типичными для соединений Fe^{3+}. Полосы на длинах волн 430, 350 и 303 нм соответствуют электронным переходам $^6A_1 \rightarrow {}^4E$, $^4A_1(^4G)$; $^6A_1 \rightarrow {}^4E(^4D)$ и $^6A_1 \rightarrow {}^4T_1(^4P)$. Однако полоса на 303 нм также может быть отнесена к парному возбуждению двух соседних ионов железа Fe^{3+} и энергетическому переходу $^6A_1{+}^6A_1 \rightarrow {}^4T_1(^4G){+}^4E$, $^4A_1(^4G)$. Наблюдаемая полоса также может быть составной из этих трех переходов [4]. По форме МКД полос можно сказать, что в них преобладает член, связанный со смешением электронных состояний различных мультиплетов в магнитном поле.

В спектрах МКД нанокомпозитов с наращенными полупроводниковыми оболочками проявляются полосы, положение которых такое же, как и в спектре SPIONs. Присутствие полупроводниковых оболочек не меняет положение и форму соответствующих полос.

МКД спектры образцов, измеренные при изменении индукции внешнего магнитного поля от 0 до ± 1,5 Тл с шагом 0,3 Тл, были разложены на полосы на длинах волн 303, 350 и 430 нм, аппроксимированные Гауссовой функцией, и для каждой полосы был посчитан g-фактор, который отражает магнитооптический отклик образца вне зависимости от концентрации и длины оптического пути. На рис. 4 представлены зависимости g-фактора образцов от индукции внешнего магнитного поля.

Видно, что образец с SPIONs имеет нулевую остаточную намагниченность, что согласуется с теорией. Нанокомпозиты с полупроводниковыми оболочками демонстрируют небольшую остаточную намагниченность, которая, как правило, характерна для многодоменных образцов. Поскольку наращивание оболочек происходило на однодоменные SPIONs, а это подтверждает отсутствие у них коэрцитивной силы, то возможная причина данного эффекта заключается в увеличение анизотропии формы и поверхности из-за нарушения симметрии в кристаллической решетке вследствие наращивания оболочек. Она препятствует перемагничеванию однодоменных частиц, что ведет к остаточной намагниченности в отсутствие магнитного поля [5]. Увеличение g-фактора после наращивания оболочки CdSe может быть связано с изменение формы нанокомпозитов. Более того, наблюдаемые результаты свидетельствуют о разном влиянии оболочки ZnS на электронные переходы: g-фактор в полосах на длинах волн 303 и 350 нм уменьшается после наращивания оболочки ZnS, в то время как для полосы на длине волны 430 нм наблюдается его увеличение.

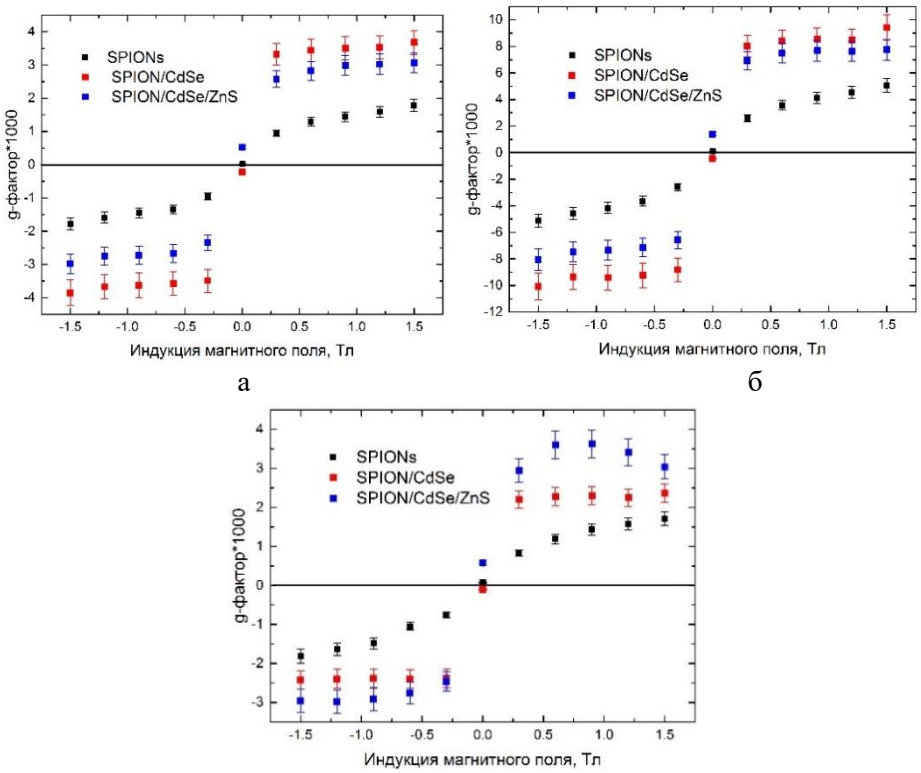


Рис. 4. Зависимость g-фактора нанокомпозитов от индукции внешнего магнитного поля в полосах на длинах волн: а) 303 нм, б) 350 нм, в) 430 нм

Стабильность нанокомпозитов

Для дальнейшего использования нанокомпозитов в качестве мультимодальной системы в биомедицине необходимо исследовать стабильность нанокомпозитов и понять, могут ли они сохранять свои свойства и монодисперсность в течение длительного времени хранения.

Люминесцентные свойства синтезированных нанокомпозитов остаются стабильными (рис. 5а) в течение двух месяцев хранения при температуре 5°C, что указывает на отсутствие деградации пассивирующей оболочки ZnS, которая проявлялась бы в тушении люминесценции.

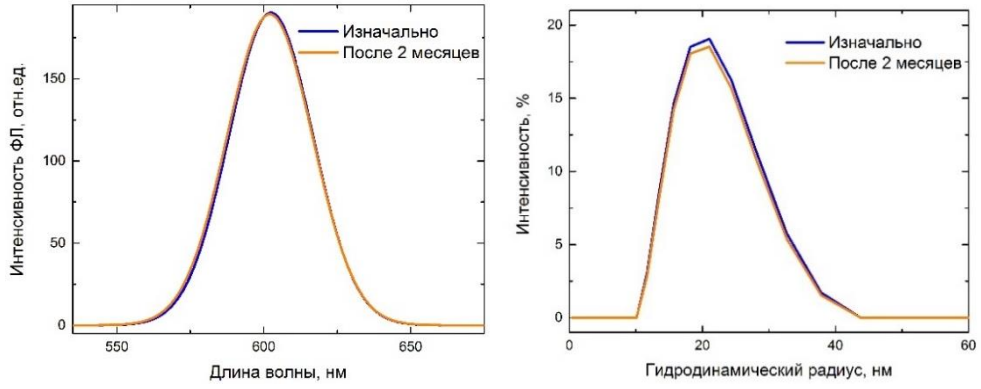


Рис. 5. Спектры ФЛ и распределения по размерам нанокомпозитов SPION/CdSe/ZnS изначально и после 2 месяцев хранения при температуре 5 °C

Следует также отметить, что при хранении коллоидного раствора нанокомпозитов их гидродинамический радиус практически не изменился (рис. 5б) и составил 21 нм, что свидетельствует об отсутствии спонтанной агрегации нанокомпозитов при

хранении и высокой коллоидной стабильности образцов. Более того, данные спектры в сочетании с изображениями SEM показывают, что рост полупроводниковых оболочек в процессе синтеза происходил на отдельных SPIONs, а не на их агрегатах.

В ходе данной работы были синтезированы коллоидные стабильные магнито-люминесцирующие нанокомпозиты. Наращивание пассивирующей оболочки ZnS привело к четырехкратному увеличению квантового выхода люминесценции за счет уменьшения поверхностных дефектов. Значительная доля «темной» фракции (95,7%), вероятно, связана с переносом энергии от слоя CdSe к магнитному SPION-ядру. Появление небольшой остаточной намагниченности у нанокомпозитов может быть связано с увеличение анизотропии формы и поверхности из-за нарушения симметрии в кристаллической решетке вследствие наращивания оболочек. Рассчитанный для каждой полосы g-фактор увеличивается после наращивания оболочки CdSe на магнитное ядро. Это может объясняться изменением формы нанокомпозитов. Продемонстрировано, что полученные нанокомпозиты полностью сохраняют свои люминесцентные свойства и монодисперсность в растворе в течение длительного хранения.

Литература

1. Qiao J. et al. Magneto-fluorescent carbon nanotube-mediated siRNA for gastrin-releasing peptide receptor silencing in neuroblastoma //RSC advances. 2013. Т. 3. №. 14. С. 4544-4551.
2. Du G.H. et al. Fe3O4/CdSe/ZnS magnetic fluorescent bifunctional nanocomposites //Nanotechnology. 2006. Т. 17. №. 12. С. 2850.
3. Колесова Е.П. Фотофизика гибридных структур на основе полупроводниковых квантовых точек и наночастиц диоксида титана: дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. СПб. 2019. 125 с.
4. Gromova Y. A. et al. Magnetic and optical properties of isolated and aggregated CoFe2O4 superparamagnetic nanoparticles studied by MCD spectroscopy //The Journal of Physical Chemistry C. 2018. Т. 122. №. 21. С. 11491-11497.
5. Бычкова А.В. и др. Многофункциональные биосовместимые покрытия на магнитных наночастицах //Успехи химии. 2012. Т. 81. №. 11. С. 1026-1050.

Сивцов Владимир Алексеевич
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
студент группы R3440,
направление подготовки: 27.03.04 – Управление в технических системах,
e-mail: sivtsovva@niuitmo.ru
Шаветов Сергей Васильевич
Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
к.т.н., доцент,
e-mail: s.shavetov@itmo.ru

УДК 004.93'11

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ

В.А. Сивцов
Научный руководитель – к.т.н., доцент С.В. Шаветов

Аннотация
В силу увеличения доступности оборудования, необходимого для осуществления распознавания лиц, возможностей его применения, а также скорости и надежности, данная технология получает все большее распространение. Распознавание лиц уже активно используется как в узкопрофильных направлениях таких как обнаружение преступников в толпе, подстраиваемая реклама в торговле и т.д. В данной работе рассмотрено применение методов распознавания лиц в системах контроля управления доступом.
Ключевые слова
Обнаружение лиц, распознавание лиц, системы контроля управления доступом, машинное обучение, техническое зрение.

В данной работе проведен анализ и оптимизация современных алгоритмов распознавания лиц для системы контроля управления доступом. Задачей является получение системы контроля управления доступом, основанной на распознавании лиц. В ней алгоритм распознавания должен быть инвариантен к масштабу и повороту головы. Обнаружение лица и сопоставление с базой данных должно осуществляться на выбранном пользователем расстоянии от 1 до 3 м от камеры (фокусное расстояние 35 мм и расположение на высоте от 2,5 до 3 м). Допустимый угол поворота головы “анфас” в любую из сторон должен составлять не менее 20 градусов. Инвариантность к вращению лица не менее 15 градусов. Точность распознавания лиц не менее 97%, доля ложноположительных срабатываний не более 0,5%. Скорость обработки изображения не более 1 с при размере базы лиц в 1 тыс. изображений и камерой с разрешающей способностью не более 15 мегапикселей.

Существующие решения позволяют с высокой точностью обнаруживать и распознавать лица, однако в некоторых случаях процесс занимает слишком долго времени, что приводит к невозможности работы в реальном масштабе времени, а, соответственно, и неприменимости к использованию в системах контроля управления доступом.

В качестве базы изображений лиц для экспериментальной апробации алгоритмов, а также для приведения характеристик системы была выбрана популярная база изображений лиц знаменитостей Labeled Faces in the Wild (LFW) [1]. LWF содержит 13233 изображений 5749 лиц, из которых 1680 представлены на двух и более изображениях. Многие изображения в LWF помимо основного лица, также содержат некоторое количество лиц на заднем фоне. Пример такого изображения представлен на рис. 1. Размер всех изображений составляет 250 на 250 пикселей.

Рис. 1. Пример изображения из LFW

Для системы контроля управления доступом предлагается использование структуры, соответствующей рис. 2.

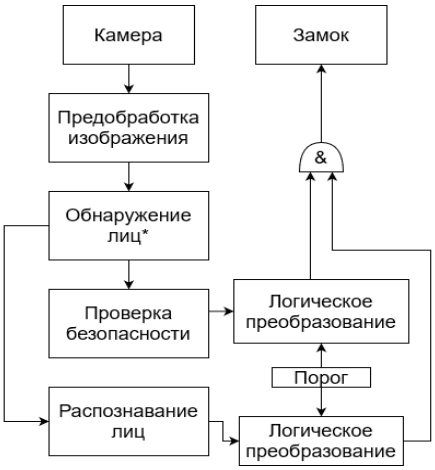


Рис. 2. Структура системы контроля управления доступа на основе распознавания лиц

С камеры изображение поступает на блок предобработки, где при необходимости меняется его размер. Оттуда изображение поступает на блок обнаружения, на котором определяется, где конкретно находится лицо на изображении. Далее, изображение проходит проверку безопасности, где определяется вероятность того, что осуществляется попытка атаки подделки идентификатора. Также изображение лица с камеры сверяется с существующими в базе лицами в блоке распознавания лиц, на выходе которого устанавливается факт наличия или отсутствия лица в базе и вероятность соответствия. С учетом установленного порога значения преобразуется в логические 0 или 1 и проходят через блок конъюнкции, выход которого является окончательным выходом всей системы на основе которого контролируется регулирующее доступ устройство.

Для тестирования обнаружения лиц среди существующих решений был выбран метод Виолы-Джонса и современный метод MTCNN, основывающийся на сверточных нейронных сетях [2, 3]. Было поставлено два эксперимента с обнаружением лиц данными алгоритмами, в одном из которых использовались стандартные настройки, а в другом задавался минимальный размер лица как параметр алгоритма. Результаты эксперимента с настройками по умолчанию приведены на рис. 3.

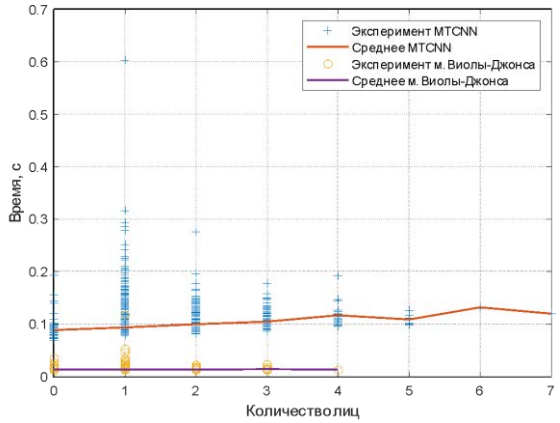


Рис. 3. Обнаружение лиц со стандартными настройками

При задании параметров алгоритмов на обнаружение лиц, размер которых не меньше 100 на 100 пикселей были получены результаты, которые представлены на рис. 4.

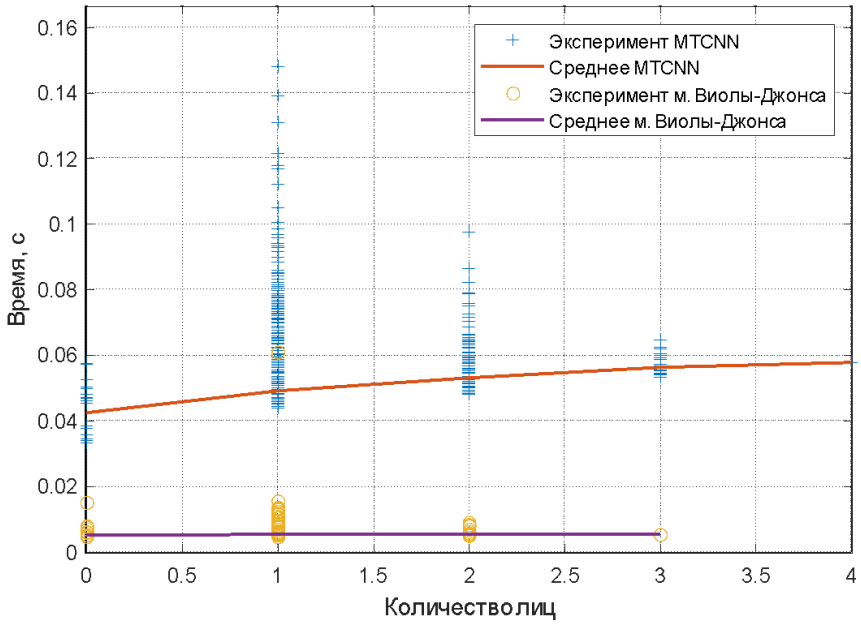


Рис. 4. Обнаружение лиц не менее 100 на 100 пикселей

С точки зрения времени обнаружения было получено ускорение в 2 раза для рассмотренных методов. Также, метод MTCNN в отличие от алгоритма Виолы-Джонса имеет время обнаружения, зависящее от количества лиц на изображении, однако прирост во времени мал и им можно пренебречь.

Обнаружение лиц является наиболее долгим процессом в распознавании для выполнения поскольку на соответствующий структурный блок поступает матрица чисел огромного размера, зависящего от разрешающей способности используемой

камеры. Для минимизации времени, необходимого для обнаружения лиц, был поставлен эксперимент по определению размеров лица в пикселях в зависимости от расстояния лица до камеры. Для обобщения результатов на все камеры с одинаковым соотношением сторон, размер лица вдоль соответствующей оси (ширина – *Ox*, длина – *Oy*) был поделен на разрешение камеры по данной оси и полученное значение обозначено как относительная ширина и длина лица. Результаты эксперимента представлены на рис. 5. Зависимость между шириной и длиной лица является линейной и определяется пропорциями лица.

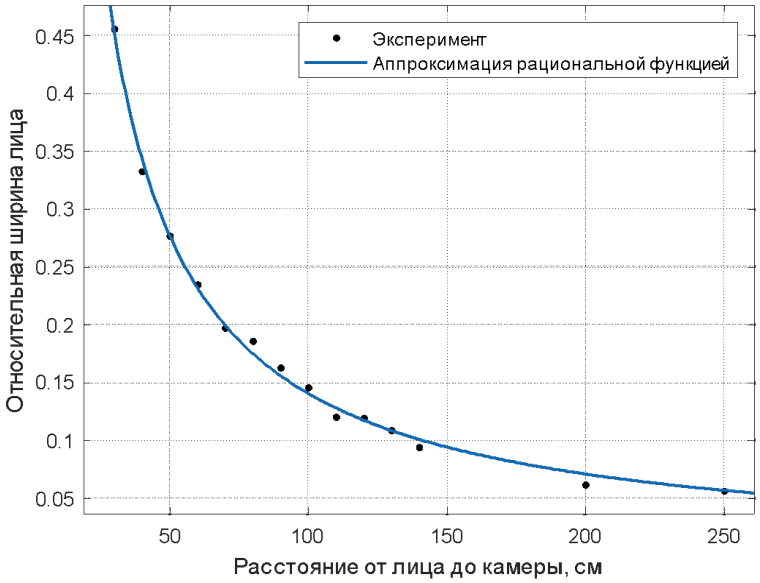


Рис. 5. Зависимость ширины лица от расстояния до камеры

Полученное ускорение обнаружения лиц для метода MTCNN продемонстрировано на рис. 6.

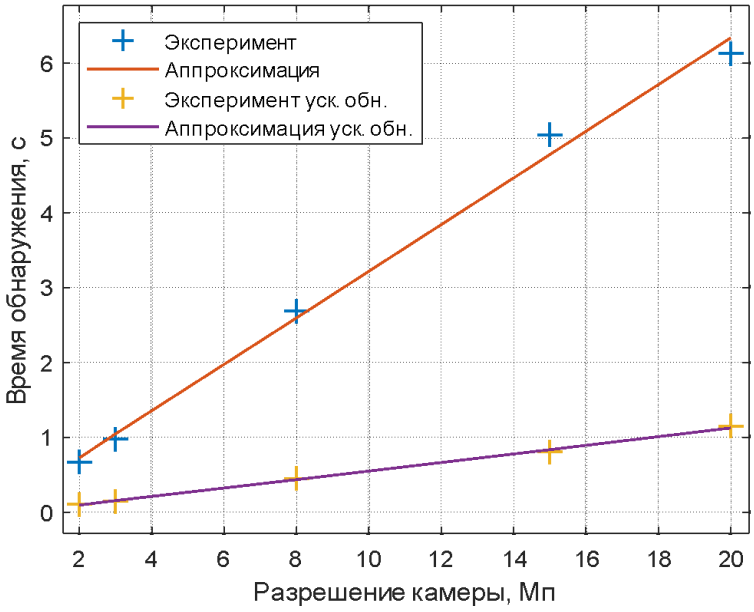


Рис. 6. Время обнаружения лиц при различных разрешениях камеры

Зависимость времени обнаружения лиц от разрешения камеры осталась линейной как для метода MTCNN, так и для алгоритма Виолы-Джонса. Метод MTCNN был выбран для использования в системе контроля управления доступом, основанной на распознавании лиц, как более точный, а также ввиду того, что на больших разрешениях камеры его скорость работы превосходит метод Виолы-Джонса.

В качестве метода для блока распознавания лиц из структурной схемы была выбрана сверточная нейронная сеть Facenet [4]. Она обладает точностью 0,9887 и низкой долей ложноположительных срабатываний на LWF, которая составляет 0,31%. На вход Facenet подается изображение лица размером 182 на 182 пикселя, которое было найдено и обрезано от заднего фона на этапе обнаружения лиц.

Понятно, что существует максимальное расстояние, на котором еще возможно распознавание лиц без потерь в точности. На основе полученных описанных ранее экспериментальных данных был построен график, иллюстрирующий зависимость разрешения камеры и данного расстояния, который представлен на рис. 7. Для увеличения расстояния, на котором возможно распознавание необходимо увеличивать разрешение камеры, причем по обеим осям. Желтой линией показано разрешение при соотношении сторон изображения камеры 1:1 (т.е. при равных разрешениях по осям *Ox* и *Oy*) и соответствующие расстояния.

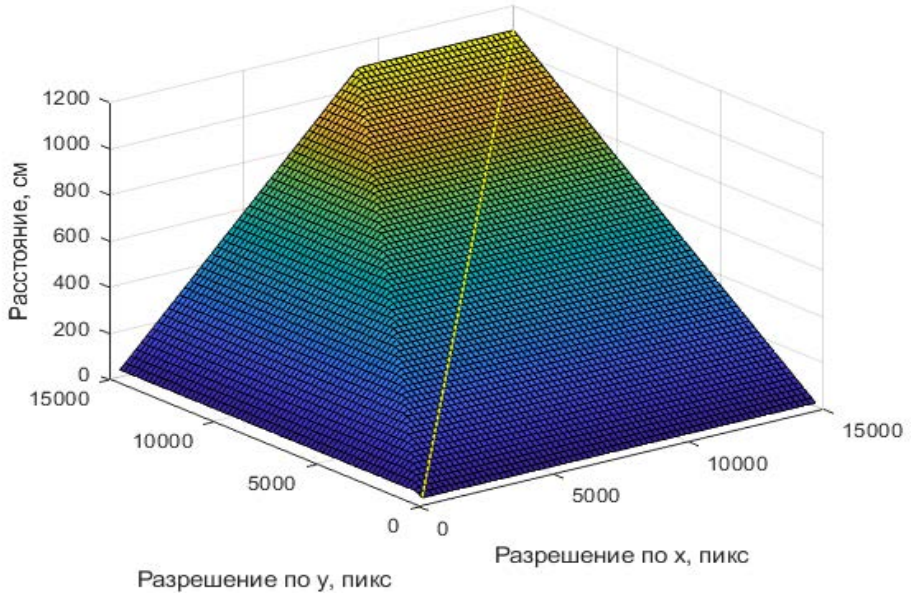


Рис. 7. Зависимость между максимальным расстоянием
для распознавания лиц без потерь в точности и разрешением камеры

С точки зрения безопасности, система без дополнительной защиты уязвима к атаке подделки идентификатора, когда к объективу камеры подносится изображение известного системе человека в каком-либо виде, например, с экрана телефона, другого электронного устройства или распечатанная фотография. Для предотвращения атаки можно использовать систему определения подделок, использующую разницу в гистограммах подделки и настоящего лица, в различных цветовых пространствах, для построения классификатора [5].

Такая система анализирует каждый кадр по отдельности и результаты классификации получаются зашумленными с появлениями неверно классифицированных кадров. Для уменьшения количества неверно классифицированных кадров был введен параметр “истории”, в который записывались предыдущие результаты классификации. При таком подходе классификация

осуществляется на основе не только текущего кадра, но и нескольких предыдущих. Для сравнения был поставлен эксперимент, в ходе которого вначале перед камерой было настоящее лицо, далее вносилась фотография лица с телефона, и, в конце, перед камерой снова было настоящее лицо. Результаты представлены на рис. 8.

Интегрирование процесса позволило предотвратить часть неверно классифицированных результатов, однако система стала инерционна и теперь переход между различными результатами классификации занимает время, хоть и незначительное. Чтобы уменьшить влияние данного недостатка, можно уменьшать количество кадров, сохраняемых в переменной “истории”.

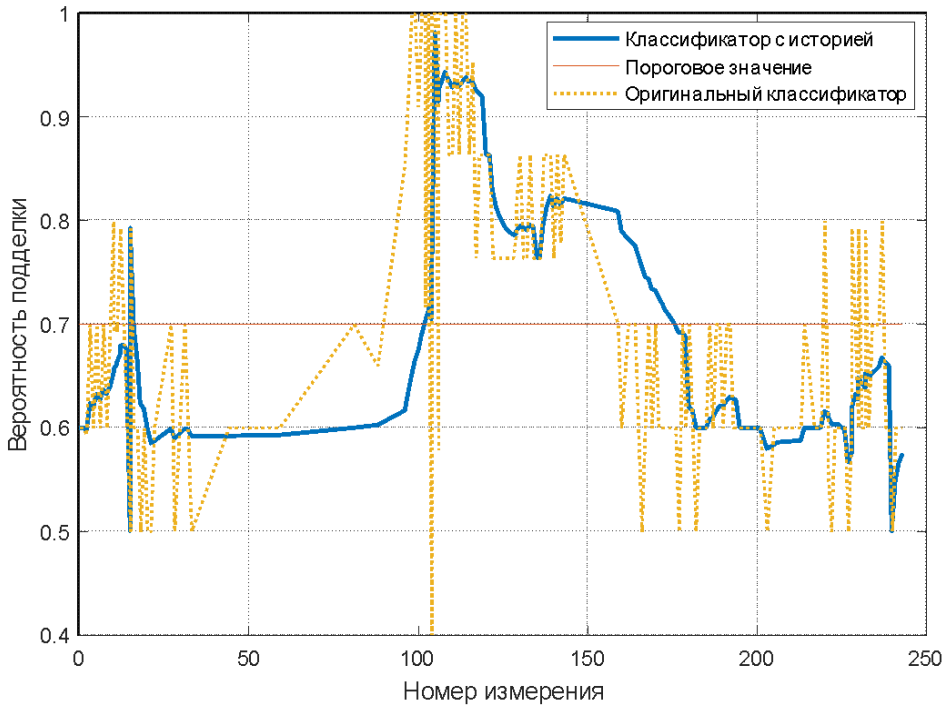


Рис. 8. Проверка безопасности системы

Таким образом, получена система контроля управления доступом, основанная на распознавании лиц с точностью 98,87%, долей ложноположительных срабатываний 0,31%, временем обработки изображения ≈ 0,5 с и инвариантностью к вращениям головы в любых плоскостях ≈ 30°. Система способна предотвратить базовые попытки несанкционированного доступа при поднесении к камере фотографий с телефона, распечатанной фотографии и т.п. Для дальнейшего улучшения надежности и качества работы системы имеет смысл применение 3D камер.

Литература

1. Gary B. Huang, Manu Ramesh, Tamara Berg, Erik Learned Miller Labeled Faces in the Wild: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments // University of Massachusetts, Amherst, Technical Report 07-49, October, 2007.
2. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001.
3. Zhang K., Zhang Z., Li Z., and Qiao Y. Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks // IEEE Signal Processing Letter. 2016.

4. Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J. FaceNet: A unified embedding for face recognition and clustering // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston. MA. 2015.
5. Costa V., Sousa A., Reis A. Image-Based Object Spoofing Detection. In: Barneva R., Brimkov V., Tavares J. (eds) Combinatorial Image Analysis // IWCIA. Lecture Notes in Computer Science, vol 11255. Springer. Cham. 2018.

Солнцев Виталий Максимович
Год рождения: 1996
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
студент группы №P3401,
направление подготовки: 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника,
e-mail: emailname@email.ru
Государев Илья Борисович
Год рождения: 1979
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
к.п.н., доцент,
e-mail: goss@itmo.ru

УДК 004.41

РАЗРАБОТКА НИЗКОУРОВНЕВОГО МОДУЛЯ ИНТЕРПРЕТАТОРА ESPRUINO ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С ПОМОЩЬЮ JAVASCRIPT

В.М. Солнцев
Научный руководитель – к.п.н., доцент И.Б. Государев

Аннотация
В работе реализованы низкоуровневые модули интерпретатора Espruino, такие как: драйвер радиоприемника для получения сигнала на частоте 433.92 МГц в универсальном формате от сторонних радио излучателей и перенесена математическая библиотека, из math.h языка C. Также были проведены практические эксперименты по исследованию работы компонентов ядра, таких как: хранение данных, встраиваемые языки (C, Assembler), сохранение прошивки в энергонезависимой памяти и формат исполнения кода.
Ключевые слова
Espruino, STM32, JavaScript, C, Assembler, Python, ECMAScript, rf-433, микроконтроллеры, интерпретатор JavaScript, встраиваемое программное обеспечение.

Целью данной работы являлось разработка низкоуровневых модулей для интерпретатора Espruino и исследование работы компонентов ядра. Предлагается подход к имплементации функций стандарта ECMAScript, не реализованных на платформе Espruino.

Espruino - проект с открытым исходным кодом, который позволяет разрабатывать встроенное программное обеспечение для различных типов микроконтроллеров с использованием методов стандарта ECMAScript [1].

Первой задачей являлось создание некоторого отсутствующего количества функций в математической библиотеке Espruino. Интерпретатор позиционирует себя как полное повторение традиционного интерпретатора SpiderMonkey или V8. Было решено доработать математическую библиотеку. Если сравнивать текущую реализацию математической библиотеки, а также библиотеку Math из стандарта ECMAScript, то можно заметить большую разницу в количестве функций, это обусловлено большими затратами памяти на исполнение. Точность вычислений связана со сложностью выделения памяти на микроконтроллере. Интерпретатор написан на языке C, но не использует malloc и free, эти функции не включены в прошивку, так как

используют большой пул ценной оперативной памяти. Таким образом, интерпретатор не использует стандартную математическую библиотеку. Поэтому текущая версия математической библиотеки была написана отдельно с использованием численных методов, эта реализация менее точная в вычислениях и работает достаточно медленно.

Функции библиотеки интерпретатора можно доработать и увеличить точность, но ограничение по возвращаемому типу данных будет сводиться к точности типа float. Поэтому более целесообразным будет расширять функционал, а не стремиться к точности.

Все недостающие функции можно реализовать двумя способами:

- разработка библиотеки JavaScript с помощью существующих математических функций;
- разработка низкоуровневого кода на языке C с последующей разработкой класса обертки для JavaScript.

В первом случае, если разрабатывать библиотеку на JavaScript с помощью базовых функций из текущей библиотеки интерпретатора, библиотека будет экономить память интерпретатора и подключаться только при необходимости использования. Но такая реализация будет занимать больше оперативной памяти.

Во втором случае, можно разработать библиотеку на C, как низкоуровневый модуль. При этом точность данных будет завесить только от самой реализации. Единственной проблемой может возникнуть возвращаемый результат, который преобразуется в тип данных float, что делает это ограничение «жестким». Интерпретатор не позволяет вернуть численный результат, который больше float по количеству разрядов. Эту проблему можно обойти способом преобразования типа double в специальный тип интерпретатора JsVar, который позволят хранить переменную в универсальном формате подобном строке. Был найден альтернативный вариант, связанный с частичным написанием собственного математического модуля, который будет использовать функции из библиотеки языка C – math.h. Чтобы внедрить эти функции, необходимо изменить Makefile интерпретатора и добавить модуль своей библиотеки. В этом модуле была подключена математическая библиотека языка C и определены функции для вызовов в JavaScript. Разумеется, это слишком большой объем для микроконтроллера, поэтому необходимо использовать способы агрессивной оптимизации «O3», это позволит сэкономить flash-память. Но при этом, многие микроконтроллеры не содержат такого объема оперативной памяти, чтобы запустить некоторые математические функции. Для этого необходимо было реализовать механизм, который проверяет доступную оперативную и flash-память микроконтроллера, если устройство не содержит достаточно ресурсов, то необходимо отключать от основной прошивки данные модули. Это было реализовано с помощью флага «SAVE_ON_FLASH_MATH», который отключал модуль из линковки. Дополнительным механизмом служили директивы препроцессора в модуле, который вызывал математические функции, также производилась проверка на доступную память, если памяти было мало, то выводилась заглушка вызванной функции. Все вычисления должны храниться не в энергонезависимой памяти, так как это может перезаписать часть прошивки Espruino и вызвать ошибки. Если произойдет повреждение загрузчика, то для его восстановления необходимо будет перезаписывать все ядро интерпретатора. Таким образом, из основной библиотеки были перенесены следующие функции, которые переопределили вручную: acosh, asinh, cbrt, copysign, erf, erfc, exp2, expm1, fdim, fma, hypot, ilogb, lgamm и другие [2]. А также расширения XSI, которые не описаны в стандартах ANSI или ISO, они присутствуют как расширения X/Open. В числе этих функций следующие:

- j0 – значение функции Бесселя первого рода порядков 0;
- j1 – значение функции Бесселя первого рода порядков 1;

- jn – значение функции Бесселя первого рода порядка n;
- y0 – значение функции Бесселя второго рода порядков 0;
- y1 - значение функции Бесселя второго рода порядков 1;
- yn - значение функции Бесселя второго рода порядков n;

Также хочется отметить, что удалось перенести функции nexttoward, nextafter, llround, lround, llrint, llrint, но они возвращают значения типов long, long long и long double, что не может обработать интерпретатор, поэтому искусственное приведение long double к float и long long к int не дает никакой разницы, если использовать вместо этих функций аналогичные для стандартных типов данных.

Второй задачей являлось создание и тестирование драйверов для взаимодействия с аппаратным обеспечением. Многие микроконтроллеры имеют разъемы для взаимодействия с платами-расширений. В частности, существует модуль радиоприемника и радиопередатчика частоты 433.92 МГц. В официальной прошивке интерпретатора нет драйвера, который позволил бы принимать радиосигнал от сторонних устройств в универсальном формате. Драйвер обрабатывает данные, которые преобразованы в специальные пакеты. В роли излучателя может быть любой пульт дистанционного управления, работающий на частоте 433.92 МГц. Излучатель передает сигнал на радиоприемник, который подключен к микроконтроллеру.

Модуль является AM-приемником и имеет один цифровой выход, не выполняет физическую фильтрацию, кодирование и декодирование. Если есть сигнал, приемник выдает логическую единицу, а если ее нет, выдает логический 0. Модули имеют довольно широкий диапазон входного напряжения (3,3 В - 12 В). Было обнаружено, что при более низких напряжениях, к примеру 3.3 В, приемник работает, но с ограниченной чувствительностью, что иногда хорошо, если есть необходимость изолировать сигнал от ближайшего передатчика.

Чтобы решить данную проблему необходимо:

- определить разъемы микроконтроллера в интерпретаторе Espruino и подключить к радиоприёмнику;
- выбрать источник радиосигнала;
- разработать модуль радиоприемника;
- реализовать возможность идентификации конкретного источника.

Для подключения радиоприемника к тестовому устройству, были привязаны разъемы тестового микроконтроллера к программным. То есть, прописаны дополнительные конфигурации в классе-обертке конкретного микроконтроллера. К примеру, чтобы привязать разъем A0 на микроконтроллере семейства STM32 NUCLEO [3], необходимо добавить следующую строку в его целевой класс:

/*JSON{"type" : "staticproperty","class" : "Nucleo","name" : "A0", "generate_full" : "NUCLEO_A0", "return" : ["pin","A Pin"]

В результате чего можно будет взаимодействовать с данными разъемами прямо из JavaScript кода.

Для следующего шага необходимо устройство излучения радиосигнала. Наиболее подходящим является пульт управления автоматизированными системами учета и контроля доступа. Главное, чтобы этот передатчик использовал постоянную последовательность отправляемых данных, а не генерировал их каждый раз заново. Иначе, на следующих этапах будет невозможно однозначно идентифицировать источник.

Существует два типа кодирования подобных источников: определенная последовательность сигналов или одиночный статичный сигнал. Разработанный модуль имеет возможность принимать оба типа.

Одна из проблем получения радиосигнала это то, что сигнал постоянно подвержен помехам, поэтому источник отправляет код несколько раз, необходимо

разбить эти сигналы на одиночные последовательности бит, которые можно будет записать и идентифицировать.

Первые 7 бит постоянно были подвержены искажениям, поэтому необходимо было провести эксперимент по выявлению наиболее часто встречающейся корректной последовательности:

- Передатчик отправляет сигнал последовательностями по 16 бит, между сигналами делает задержку в 200 мс. Таким образом, можно различать эти последовательности.
- Последовательности бит выводились в терминал отладки, после чего были сохранены в текстовый файл. Каждую последовательность необходимо считать достаточное количество раз, поэтому каждая кнопка пульта поочередно зажималась на 5 минут. Нажатие двух кнопок на каждом из двух пультов отрабатывалось в течение 20 минут.
- Далее необходимо выявить наиболее часто повторяющуюся последовательность бит, это наиболее вероятная правильная комбинация, которая была заложена в передатчике. Для этого был написан отдельный скрипт на Python.

Скрипт позволил выявить наиболее часто встречающиеся последовательности, которые выводились в более чем 90% всех случаев. Результат работы скрипта позволил идентифицировать каждое нажатие на кнопки пультов и добавить события вывода. Пульт дублирует отправку кода по 4 раза, так что даже из поврежденных помехами данных удалось получить необходимую последовательность. Но если источников помех достаточно много и приемник не оснащен хорошей антенной, то даже при дублирующей отправке нет гарантии, что данные буду корректно получены.

Поскольку разработанный драйвер необходимо было протестировать в различных условиях, в том числе при помехах или перекрёстном излучении сигналов нескольких пультов, было разработано графическое приложение в формате простой викторины, требующего ответа «Да» или «Нет». В данном приложении подключаются два устройства излучения радиосигнала с закодированными кнопками. Работает по принципу, кто первый ответил, тот и получает балл, иначе теряет. Взаимодействие с сервером происходит посредством передачи данных через COM порт, но в перспективе это можно делать через сети Wi-Fi или Bluetooth. Схема взаимодействия устройства получения радиосигнала представлена на рисунке.

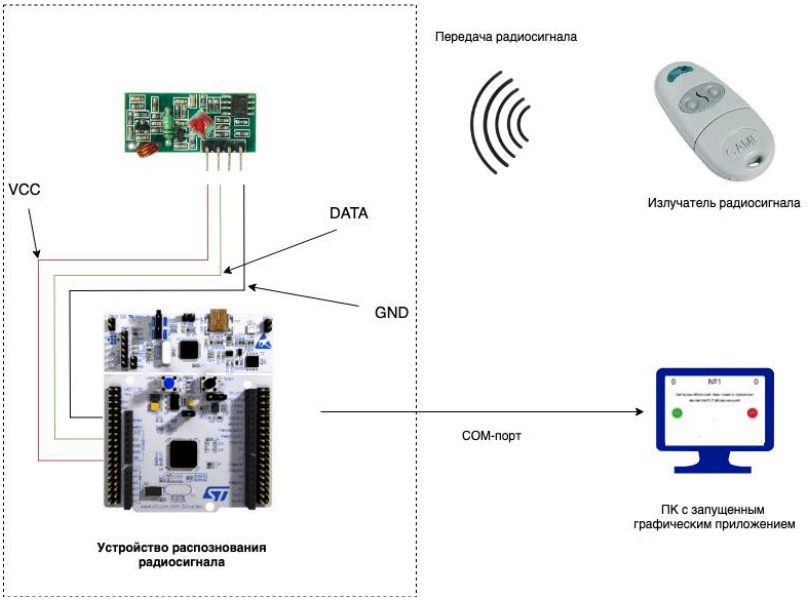


Рисунок. Схема взаимодействия устройства получения радиосигнала

Третей задачей являлось описание работы ядра интерпретатора. Были описаны процессы, происходящие в ядре при загрузке кода JavaScript в память микроконтроллера. Особенность Espruino заключается в том, что все ядро интерпретатора не нужно перезаписывать, достаточно лишь загрузить код JavaScript в оперативную память, что намного быстрее загрузки традиционных прошивок на микроконтроллеры.

В результате анализа эффективности интерпретатора были выявлены особенности, такие как: переменные хранятся в связанном списке, поэтому выделение и освобождение памяти равно сложности алгоритма O(1), фрагментация памяти не является проблемой, malloc обычно имеет 4-байтовые расходы для каждого блока, что является достаточно много и можно обходиться стандартным резервированием переменных по 16 байт (или по 12 байт для микроконтроллеров с меньшим объемом оперативной памяти) [4].

В результате проделанной работы была осуществлена разработка низкоуровневых модулей: расширена и доработана математическая библиотека интерпретатора до уровня библиотеки math.h языка C, разработан драйвер радиоприемника, позволяющий принимать сигнал от любого стороннего излучателя, а также написано графическое приложение для взаимодействия микроконтроллера с веб-браузером. Была проведена исследовательская часть работы по интерпретатору с практическими экспериментами на тестовом устройстве STM32F401 NUCLEO RE. Исследовательская часть показала, как интерпретируется JavaScript и встраиваемые языки, такие как C и Assembler, описана эффективность интерпретатора при решении практических задач и процесс компиляции ядра интерпретатора.

Данный проект активно развивается и сконцентрирован на расширении спецификации ECMAScript. Огромное количество функций требует доработок, но уже сейчас этот интерпретатор можно использовать для разработки любительских прототипов.

Литература

1. Espruino [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.espruino.com/ (дата обращения: 11.04.2020).
2. Бен Клеменс Язык C в XXI веке. изд. O`REILLY, 2015. 376 с.
3. STM32 Nucleo-64 boards User Manual // St [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.st. com/resource/ en/user_manual/ dm00105823-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf (дата обращения: 01.05.2020).
4. Trevor Martin The Insider's Guide to the STM32 ARM Based Microcontroller. Coventry: Hitex (UK) Ltd, 2008. 88 c.

Хусаинов Анвер Русланович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет информационных технологий и программирования,
студент группы №M3439,
направление подготовки: 01.03.02 – Прикладная математика и информатика,
e-mail: hanver@mail.ru
Сметанников Иван Борисович
Год рождения: 1990
Университет ИТМО,
факультет информационных технологий и программирования,
к.т.н., доцент,
e-mail: smeivan@mail.ru

УДК 004.852

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА СВЯЗЕЙ МЕЖДУ МЕТРИКАМИ ПО МНОЖЕСТВУ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А.Р. Хусаинов
Научный руководитель – к.т.н., доцент И.Б. Сметанников

Работа выполнена в рамках темы НИР №220002 «Разработка метода и моделей машинного обучения для выявления зависимостей между короткими и длинными метриками социальной сети и в активном обучении для мультимодальных нейронных сетей».

Аннотация
В работе рассмотрена задача поиска причинно-следственных связей между различными метриками социальной сети ВКонтакте. Рассмотренные каузальные методы должны уменьшить присутствие ложных корреляций между метриками. Нахождение таких связей должно помочь оптимизировать те метрики, которые наилучшим образом отражают интерес пользователя к сервису. В работе был также предложен способ, позволяющий получать более качественные связи при учете ориентации ребер.

Ключевые слова
Вывод связей, байесовская сеть, A/B тестирование, социальная сеть, скрытые переменные, каузальные методы.

Современные крупные сервисы регулярно считают метрики того, как пользователи взаимодействуют с их сайтом или приложением. При этом интересно не только их считать, но и знать, как на них можно влиять, чтобы предсказуемо оптимизировать. Такие показатели можно разделить на 2 категории: короткие метрики и долгие. Короткие метрики также называют кликовыми из-за того, что для их подсчета считаются клики пользователей: «лайки», «репосты» и т.д. Такие метрики обычно можно изменять достаточно предсказуемо, например, выдавая пользователем те посты, которые они будут чаще «лайкать» или комментировать. Однако более интересны долгие метрики, такие как время, проведенное в приложении или число уникальных сессий пользователя. Их оптимизация и является приоритетной задачей, но на них влиять уже гораздо сложнее. И выдвигается гипотеза о том, что короткие метрики влияют на долгие. Поиск этих конкретных каузальных связей и является целью моей работы. В качестве исходных данных были предоставлены результаты A/B

тестирования при различных конфигурациях тестовой группы относительно контрольной. Эти относительные изменения также сопровождались p_{value} при нулевой гипотезе о том, что изменение равно нулю. При этом важно понимать, что долгие метрики, как и короткие могут зависеть от причин, которые не наблюдаются, в работе этому уделено отдельное внимание.

Существующие методы, как правило, страдают от ложных корреляций между метриками. Так, например, в статье [1] предлагается искать связи между метриками через линейную регрессию с использованием l_0-регуляризации, которая делает значение равным нулю, если p_{value} слишком высокое (то есть изменение не является статистически значимым). Такая регуляризация позволяет уменьшить смещение вектора весов w от истинного вектора весов. Смещение появляется из-за того, что при использовании линейной регрессии длинной метрики на короткие не учитываются неизвестные факторы. Несмотря на это, у этого метода есть несколько важных ограничений. Во-первых, он позволяет рассматривать только линейные зависимости между переменными и, во-вторых, он не учитывает ложные корреляции.

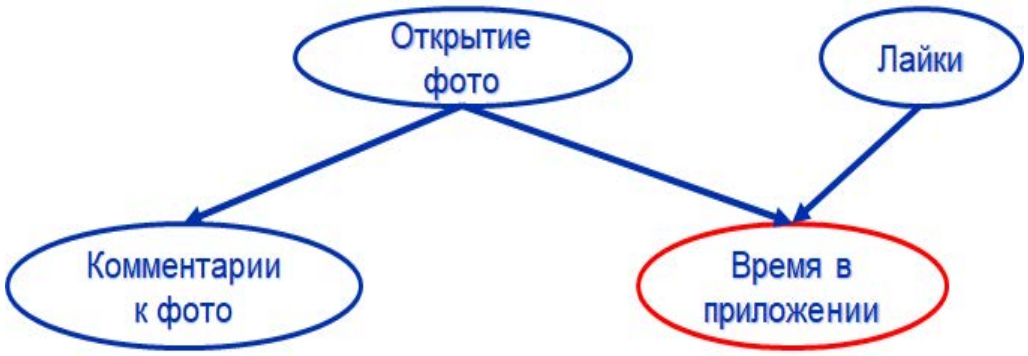


Рис. 1. Пример ложной корреляции

На рис. 1 представлен пример такой ложной корреляции. Не умаляя общности предположим, что в направлении стрелки идет положительное влияние, то есть чем больше лайков, тем больше SPU (Sessions per user). В таком случае можно будет установить, что комментарии к фото положительно влияют на SPU. Из-за этого можно пытаться увеличивать эту метрику, ожидая увеличение SPU. Такое явление называется ложной корреляцией**,** когда коэффициент корреляции достаточно высокий, но причинно-следственной связи нет. Она проявляется не только у двух следствий одной причины. Из этого же графа можно было бы сделать неверный вывод и о том, что лайки положительно влияют на количество открытий фото. Даже на таком простом примере становится очевидно, что простой анализ корреляций приведет к очень большому количеству неверных выводов.

Чтобы обойти эту проблемы были подробно рассмотрены методы вывода каузальных связей. Были рассмотрены возможные источники с исследованием применения алгоритмов вывода каузальных связей, однако не было найдено их использования контексте A/B тестирования. Существенную часть времени потребовалось потратить на то, чтобы ознакомиться с теорией, необходимой для понимания работы базовых и модифицированных алгоритмов в этой области. Одним из наиболее известных алгоритмов является IC (Inductive Causation) и PC (Peter, Clark) алгоритм вывода связей. Эти алгоритмы строят каузальные графы на основе проведения множества статистических тестов на условную независимость величин. Серьезным теоретическим недостатком таких алгоритмов является то, что они опираются на гипотезу Causal Sufficiency. Она звучит следующим образом: все общие

предки двух и более переменных во множестве вершин V в истинном каузальном графе над вершинами V содержатся в V или имеют одинаковое значение для всех наблюдений. Менее формально, она говорит о том, что все величины (вершины) наблюдаемы, то есть отсутствуют скрытые переменные, которые влияют на распределение. Такое предположение, как правило, является слишком оптимистичным, поэтому данная гипотеза редко выполняется на реальных данных. Из-за этого были разработаны алгоритмы, строящие каузальные графы только над наблюдаемыми переменными. В работе было рассмотрено семейство таких алгоритмов, которое называется CI (Causal Inference), наиболее популярным из которых является FCI (Fast Causal Inference) и его модификации, предлагающие уменьшение количества проводимых тестов на условную независимость. В работе все сравнения проводились с алгоритмом FCI+ [2], который гарантирует полиномиальное от числа вершин время работы, если максимальная степень вершины выводимого графа ограничена сверху константой. Каузальные графы, как правило, являются достаточно разреженными, поэтому этот алгоритм работает действительно быстро и на практике.

Эффективные реализации данных классических алгоритмов на языке программирования R и C++ (и их гибриде – RCPP) написаны в открытой библиотеке pcalg [3]. До этого работа над данной проблемой проводилась на языке Python, поэтому в рамках работы также были созданы так называемые «обертки» над функциями библиотеки, чтобы вызывать ее функции с Python.

К сожалению, у этих подходов есть серьезный недостаток – они опираются на гипотезу Faithfulness, которая, простыми словами, говорит о том, что существует идеальный тест на условную независимость. Однако такого теста, конечно же, тоже не существует, вместо него, как правило, используют тест на основе частной корреляции. Это связано с тем, что такой тест можно весьма эффективно считать на основе лишь матрицы ковариаций, то есть после предподсчета он считается вне зависимости от количества наблюдаемых данных (только от количества метрик). Однако, несмотря на невыполнимость этой гипотезы, алгоритмы все еще строят достаточно убедительные «скелеты» каузальных графов, то есть графы без учета ориентированности ребер. К сожалению, с ориентацией ребер проблем уже становится больше. А именно: появляется слишком много «двунаправленных» связей. Если Causal Sufficiency выполняется, то двунаправленное ребро означает, что оба направления ребра допустимы в рамках класса эквивалентности истинной структуры. Если же эта гипотеза неверна, то такое ребро имеет следующую семантику: если между вершинами A и B есть «двунаправленно» ребро, то существует ненаблюдаемая переменная C, которая влияет на A и B. На реальном наборе данных присутствие «двунаправленных» ребер выглядит абсолютно естественным: действительно, почти все величины могут быть объяснены влиянием какой-то третьей, ненаблюдаемой. К сожалению, такое объяснение является абсолютно неинформативным, поэтому были рассмотрен способ, который позволил бы уменьшить количество ориентированных ребер, допуская меньше ошибок именно в этой стадии работы алгоритма, а не при построении скелета.

В классических алгоритмах, подавляющее количество ребер ориентируется по следующему правилу: если вершины X и Z разделены множеством S_{XZ} (то есть X и Z условно независимы при известном S_{XZ}), и имеют общего соседа Y, который не входит в S_{XZ}, то ребра ориентируются как $X \rightarrow Y$, $Z \rightarrow Y$. Такая тройка ребер будет называться v-структура или «коллайдер». Однако из-за невыполнимости Faithfulness гипотезы, это не совсем корректно. Например, вершина Y могла просто не рассматриваться на роль кандидата в разделяющем множестве, потому что это множество было найдено даже до рассмотрения Y. В более общем случае предлагается проверять то, что добавление вершины Y в S_{XZ} уменьшает вероятность условной независимости X и Z больше, чем на некоторое пороговое значение. Если вероятность условной независимости с

добавлением Y в S_{XZ}, то это говорит о том, что Y «открывает» поток информации между X и Z, что является серьезным признаком v-структуры. Такой подход позволяет также регулировать количество ориентированных ребер при необходимости.

Второй подход по улучшению построенных каузальных графов заключался в добавлении шума к данным. Идея добавления шума взялась при рассмотрении некоторых синтетических примеров, где эта процедура помогала полностью восстановить каузальный граф. При более детальном изучении было предложено обоснование, в каких случаях добавление шума может помогать. В частности – при наличии сильно коррелированных величин. Эффект добавления шума продемонстрирован на рис. 2. Здесь на рис. 2.а) изображена истинная байесовская сеть, а на рис. 2.б) показана байесовская сеть на данных, сгенерированных из этой сети. Как можно заметить, не удалось восстановить ни скелет, ни направления ребер графа. Однако добавление к данным 5% от стандартного распределения помогло восстановить структуру графа полностью (рис. 2.в)).

Одной из очень серьезных трудностей в выводе каузальных связей является сравнение и оценка моделей [3, 4]. Дело в том, что обычно истинное каузальное представление реальных данных неизвестно. Тем более оно неизвестно с точки зрения распределения настолько точно, чтобы генерировать из него реальные данные. То есть неизвестен ground truth для большинства наборов данных. Поэтому возникает дилемма: использовать (полу-)синтетические данные с известным ground truth или пытаться обходиться без ground truth, но тестировать на реальных данных. В своей работе я попробовал реализовать оба подхода для тестирования.

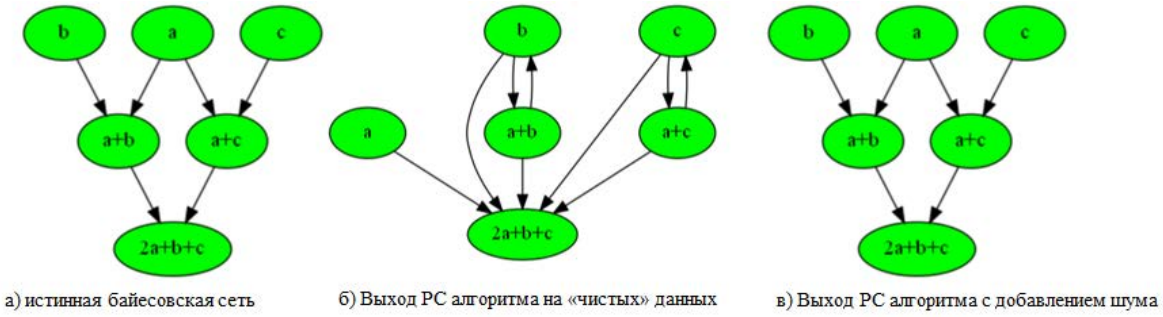


Рис. 2. Пример с добавлением шума

Первый из них – оценка правдоподобия графа:

$$score_L(G) = \sum_{PA_G(X)\neq\emptyset} I\big(X, PA_G(X)\big) - \sum_X H(X),$$

здесь $PA_G(X)$ – множество родителей вершины X, $I(X,Y)$ – совместная информация величин X и Y, а $H(X)$ – энтропия величины X. На самом деле, второе слагаемое не зависит от структуры графа, поэтому считают, как правило, только первое. Однако можно также заметить, что правдоподобие не убывает от добавления новых ребер, что необходимо учитывать при сравнении. Также важно понимать, что такая оценка может работать только для сравнения байесовских сетей (выхода PC алгоритма), поэтому выходы алгоритмов без Causal Sufficiency так сравнить не удастся, так как в них двойные ребра имеют сильно иную семантику.

Поэтому была сравнена ориентация ребер моими модификациями и классическим PC алгоритмом, результат сравнения представлен на рис. 3 на так называемых «диаграммах размаха». Первый алгоритм на обоих рисунках – классический PC алгоритм, второй – PC алгоритм с предложенной ориентацией ребер, а третий – классический PC алгоритм с добавлением шума к данным.

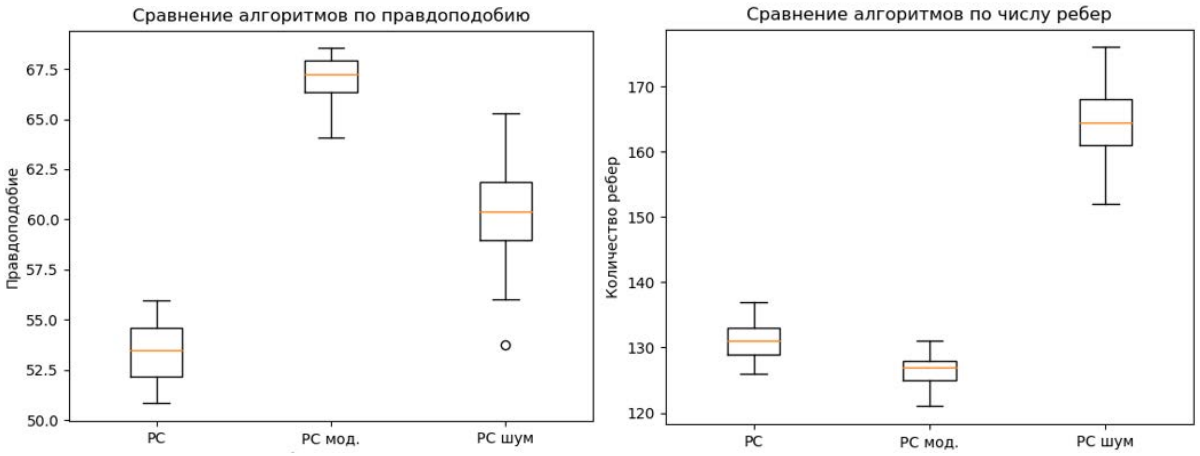


Рис. 3. Сравнение алгоритмов по методу правдоподобия

Как можно заметить по рисункам, новая ориентация ребер позволяет получать значительно более правдоподобные структуры графа, хотя число ребер становится даже ниже чем в классическом PC алгоритме. Добавление шума, однако, дает не столь заметный прирост в правдоподобии, но еще и сильно усложняет структуру графа, создавая больше ориентированных ребер.

Перейдем ко второму способу сравнению. Будем строить каузальный граф, например, PC алгоритмом, и выбирать из этого графа случайный ациклический граф. После этого будем генерировать данные в каждой вершине как линейную комбинацию значений в родительских вершинах с коэффициентами ± [0.2, 0.8] с добавлением Гауссова шума. Вершины, которые не имеют родителей, генерировались из нормального распределения с параметрами как в наборе данных для соответствующей вершины. После того как данные получены, будем применять к ним алгоритмы, которые хотим оценить. При этом у нас уже есть истинный каузальный граф. Осталось только понять, как сравнивать полученные графы с истинным. В работе использовалась терминология классификации. Будем считать, что проведенное ребро это Positive класс, а непроведенное, соответственно, Negative. Тогда True Positive (TP) это когда мы провели то же ребро, что и в истинном каузальном графе, а False Positive (FP) это когда мы провели ребро, которого в истинном каузальном графе нет. Причем будем оценивать эти величины с точки зрения скелета.

Для учета направления введем $TP_{misorient}$ для ребер, которые выведены верно, но их направление выбрано неверно. После этого будем считать $TP' = TP - TP_{misorient}$ и $FP' = FP + TP_{misorient}$. После этого можно считать F_1-меру как для скелета, так и с учетом ориентации (которая, очевидно, будет не выше такой меры для скелета). Однако в случае PC алгоритма двойное ребро добавляет к $TP_{misorient}$ только 0.5, а не 1, потому что одно из реальных ребер все-таки выведено (без Causal Sufficiency это было бы не верно).

На рис. 4 предложено сравнение алгоритмов при выполнении гипотезы Causal Sufficiency и без неё. Первые два результата на обоих графиках – F_1-мера для скелета графа и является, по сути, оценкой сверху, на результат с учетом ориентации. На последних двух результатах ориентация уже учитывается. Как видим, при выполнении гипотезы мой алгоритм ориентации практически не улучшил результат классического PC алгоритма. Однако, когда гипотеза не выполнена, результат при моей ориентации ребер становится намного лучше, чем у классического алгоритма.

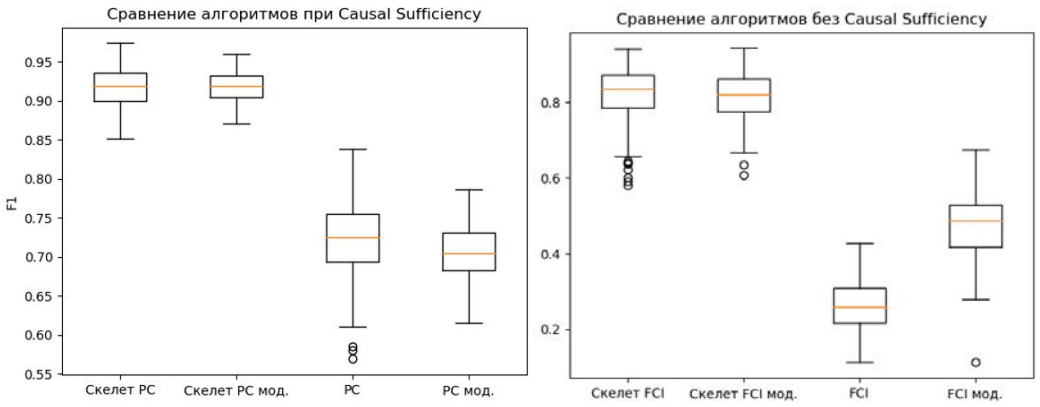


Рис. 4. Сравнение алгоритмов на полусинтетических данных

Было проведено также следующее сравнение. Скелет графа при невыполненной гипотезе Causal Sufficiency строился с помощью PC алгоритма (это первый шаг FCI и FCI+ алгоритмов), а ориентация проводилась с помощью моего алгоритма без Causal Sufficiency. По рис. 5 видно, что скелет графа даже без выполнения Causal Sufficiency достаточно строить PC алгоритмом, так как он практически не отличается от того, что строит FCI алгоритм. Но при этом PC алгоритм намного быстрее.

В ходе работы были сделаны следующие выводы. Во-первых, каузальные методы позволяют обходить ограничения, накладываемые линейной регрессией. Во-вторых, предложенный алгоритм ориентации ребер позволяет получать результаты лучше, чем классические алгоритмы, по проведенному сравнению. Однако про добавление шума не получилось сделать однозначный вывод, несмотря на его полезность на синтетическом примере с рис. 2. Последний вывод, который хочется отметить заключается в том, что PC алгоритм позволяет получать достаточно качественный скелет, который можно ориентировать предложенным алгоритмом. При этом PC алгоритм значительно быстрее алгоритмов без Causal Sufficiency (рис. 5).

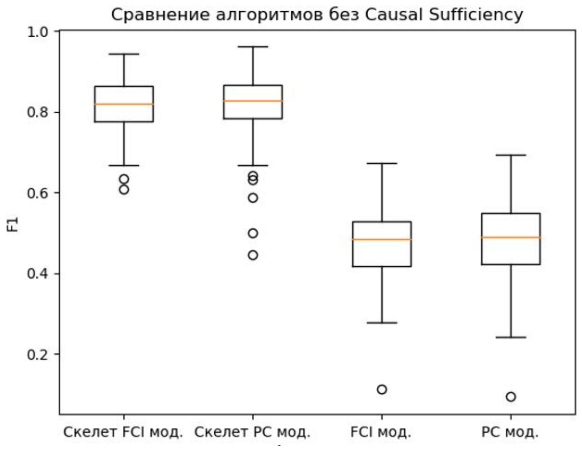


Рис. 5. Проверка разницы между классическими алгоритмами с предложенной ориентацией

Литература

1. Peysakhovich A., Eckles D. Learning Causal Effects From Many Randomized Experiments Using Regularized Instrumental Variables. // International World Wide Web Conferences. 2018. P. 699–707.
2. Claassen T., Mooij J., Heskes T. Learning sparse causal models is not NP-hard // arXiv preprint arXiv:1309.6824. 2013.

3. Causal Inference Using Graphical Models with the R Package pcalg / M. Kalisch [et al.]. 2012. URL: http://r- forge.r- project. org/projects/pcalg/ ; visited on 2020-06-20.
4. Gentzel A., Garant D., Jensen D. The Case for Evaluating Causal Models Using Interventional Measures and Empirical Data // Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. P. 11717–11727.

ЛАУРЕАТЫ III СТЕПЕНИ КОНКУРСА
НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»

Ал-Наим Рами Иса
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
студент группы №R3435,
направление подготовки: 15.03.06 – Интеллектуальные технологии в робототехнике,
e-mail: rami.naim2010@yandex.ru
Капитонов Александр Александрович
Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
к.т.н., доцент,
e-mail: kapitonov.aleksandr@itmo.ru

УДК 004.932.2

ДЕТЕКЦИЯ ЛИНИЙ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Р.И. Ал-Наим
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Капитонов

Работа выполнена в рамках темы НИР №619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Аннотация
В данной статье будет предложен новый способ бинаризации изображения с целью детекции линий дорожной разметки. Предлагаемый метод основан на использовании цветового пространства CIE LAB, а также новой формулы для расчета значения порога бинаризации, основанного на распределении яркости пикселей на изображении. Предложенный алгоритм был сравнен с существующим решением, а также протестирован на открытом датасете Lamas.
Ключевые слова
Компьютерное зрение, обработка изображений, беспилотный транспорт, бинарная классификация, бинаризация изображений.

В последние годы растет интерес к области беспилотного транспорта: большие автокомпании вкладывают большие деньги в исследования на тему систем управления автотранспортом и обработки изображений, появляются новые открытые проекты, направленные на создание беспилотных автомобилей. На фоне этого появилась необходимость в создании систем обработки изображений, разработанных специально для применения в задачах управления беспилотным транспортом.

Существует множество различных решений задачи детекции линий дорожной разметки и полосы движения. Развитие методов машинного обучения объясняет частое применение нейронных сетей для обработки информации с датчиков беспилотного транспортного средства. Нейронные сети позволяют достичь высокого уровня точности обнаружения линий дорожной разметки или области дорожной полосы. Различные архитектуры нейронных сетей позволяет качественно обрабатывать данные с камер и лидаров. Однако, алгоритмы машинного обучения требуют наличие размеченного датасета для обучения, а также большой вычислительной мощности на этапе обучения и, зачастую, для обеспечения быстродействия обработки данных с сенсоров.

В условиях ограниченной доступной вычислительной мощности в качестве сенсоров можно использовать камеры и алгоритмы компьютерного зрения для обработки изображений. Данный подход не требует размеченных данных для обучения, и часто не требует больших вычислительных мощностей. Один из существующих методов детекции линий дорожной разметки — это бинаризация изображения, основанная на цветах линий разметки в цветовом пространстве HSV. При постоянном и равномерном освещении этот метод показывает хорошие результаты, но при изменении условий освещения меняется и цвет пикселей на изображении с RGB камеры. Это приводит к наличию большого количества шума на полученной бинарной маски (рис. 1). В данной статье будет предложен новый алгоритм бинаризации цветного изображения, устойчивый к изменениям в освещении.

Рис. 1. Пример зашумленной бинарной маски

Один из методов уменьшения влияния освещения на работу алгоритма является выбор подходящего цветового пространства. Подавляющее большинство камер, представленное на рынке, являются камеры с RGB матрицей. Свет, отраженный от объектов на сцене проходит через оптическую систему и попадает на фоточувствительную матрицу, которая состоит из повторяющихся групп светодиодов, накрытых светофильтрами. Один из самых популярных способ расположения светодиодов на матрице — фильтр Байеса (рис. 2). Процессор камеры обрабатывает данные со светодиодов и объединяет выходные сигналы соседних светодиодов. Таким образом, создается RGB изображение, в котором каждый пиксель кодируется тремя значениями: уровнем красного, зеленого и синего цветов.

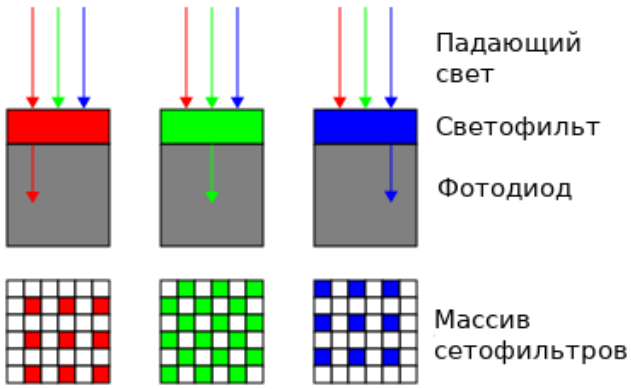


Рис. 2. Схема фильтра Байеса

Цветовое пространство RGB является аддитивным, то есть цвета получаются путем смешения трех базовых цветов. Данное пространство удобно для отображения изображений на различных дисплеях, однако не подходит для задач компьютерного

зрения. Пространство RGB обладает большим недостатком: хроматическая и яркостная составляющая пикселя не разделена, следовательно, сложно предсказать, каким образом изменятся значения пикселя при изменении освещения.

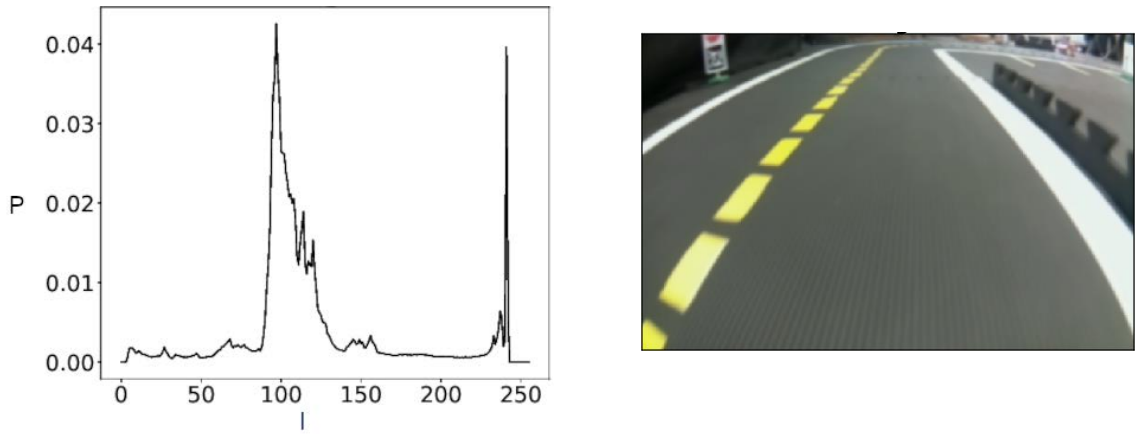
В ходе исследования различных цветовых пространств было принято решения использовать цветовое пространство CIE Lab (в различных источниках также обозначается как L*a*b, Lab) [1]. Данная модель была разработана специально для инвариантного представления цветов на изображений и основана на гипотезах о строении зрительной системы человека. В пространстве Lab каждый пиксель кодируется тремя значениями:

1) L - яркость;
2) a - цвет от зеленого до красного;
3) b - цвет от синего до желтого.

В ходе изучения изображений реальных дорог в формате CIE Lab были сформированы две гипотезы:

1) линии дорожной разметки ярче дорожного полотна;
2) линии дорожной разметки занимают около 3% от всего изображения.

Учитывая первую гипотезу и построив гистограмму распределения яркостей пикселей на изображении, можно сказать, что пиксели линий дорожной разметки будут находиться в правой части распределения. Это хорошо заметно на изображениях, полученных из образовательного проекта Duckietown [2] (рис. 3). В правой части гистограммы заметен пик, который соответствует линиям дорожной разметки. Согласно второй гипотезе, количество этих пикселей составляет примерно 3%, то есть они ярче порядка 97% всех остальных пикселей на изображении, тогда как остальные пиксели дорожного полотна будут формировать на гистограмме группу пикселей со схожей интенсивностью в более темной части распределения.



а б

Рис. 3. Пример распределения яркости пикселей: гистограмма L-канала изображения, P — вероятность пикселя с определенной интенсивностью, I — уровень интенсивности пикселя (а); исходное RGB изображение (б)

Для расширения диапазона предлагается нормализировать L канал методом MINMAX, а затем аппроксимировать его гауссовским распределением. Используя свойство трех сигм, можно предположить, выше какого значения будут находиться 3% самых ярких пикселей на изображении. Зная это значение, изображение можно бинаризовать, используя формулу (1). Таким образом, пиксели дорожной разметки будут иметь значение 1, а остальные пиксели – 0.

$$I = \begin{cases} 1, \text{если } t \geq t_{\text{п}} \\ 0, \text{если } t < t_{\text{п}} \end{cases} \quad (1)$$

Нормальное гауссовское распределение характеризуется средним значением и среднеквадратичным отклонением [3]. Предлагается рассматривать нормализированное распределение яркости пикселей со средним значением μ и среднеквадратичным отклонением σ как нормально распределение с параметрами μ и σ. Тогда, учитывая правило трех сигм, можно рассчитать порог бинаризации по формуле (2).

$$t = \mu + \sigma\left(k + \frac{1}{2}\frac{\sigma}{\sigma_u}\right), \quad (2)$$

где t – порог бинаризации, μ – среднее значение яркости пикселей на изображении, σ – среднеквадратичное отклонение яркости пикселей на изображении, k – настраеваемый коэффициент, значение которого зависит от размера дорожной разметки на изображении, σ_u - среднеквадратичное отклонение нормального распределения.

Величина t будет принимать значение в интервале (μ + 2σ; μ + 3σ), и, согласно свойству нормального распределения, которым аппроксимируется распределение интенсивностей на изображении, выше этого значения будет находиться около 2-3% самых ярких пикселей изображения. Точное значение порога t будет зависеть от значения среднеквадратичного распределения σ. При высокой контрастности изображения гистограмма может иметь несколько максимумов, а вероятности появление пикселей будут распределена по всему диапазону интенсивностей. Вследствие этого, σ и отношение σ к σ_u будут иметь относительно высокое значение, и значение порога бинаризации будет высоким. Это может привести к тому, что не все пиксели дорожной разметки будут иметь интенсивность больше, чем пороговое значение t, однако это уменьшает вероятность детекции ярких пикселей, не относящихся к дорожной разметке. Среднеквадратичное отклонение интенсивности σ менее яркого изображения будет меньше, так как большое количество пикселей, относящихся к дорожному покрытию, будут обладать низким уровнем интенсивности. Тогда отношение σ к σ_u также будет меньше, следовательно, порог бинаризации будет ниже. Это позволяет повысить вероятность того, что все пиксели дороги будут иметь интенсивность выше пороговой.

Для снижения влияния шумов к изначальному RGB изображению применяется гауссовское размытие, а для улучшения качества полученной бинарной маски к ней применяется морфологический фильтр типа закрытие с квадратным структурным элементом.

Предлагаемый алгоритм был сравнен с существующим алгоритмом детекции линий дорожной разметки, который используется в проекте Duckietown [2]. В нем используется бинаризация изображения на основе информации о цвете дорожной разметки в цветовом пространстве HSV. Для сравнения двух алгоритмов было получено 50 изображений с официального сайта проекта размером 120x160 пикселей, а затем их яркости были искусственно изменены при помощи гамма преобразования к коэффициентами γ=2.7 (темный датасет) и γ=0.6 (яркий датасет). В качестве оцениваемых метрик были выбраны часто используемые в задачах бинарной классификации метрики [4]: точность, чувствительность, Intersection over Union (IoU, или коэффициент Жаракка), F1 метрика, а также время обработки изображения. Оба алгоритма были настроены на работу на изначальном датасете. Алгоритмы тестировались отдельно на каждом датасете на одноплатном компьютере Raspberry Pi4, результаты сравнения представлены на рис. 4.

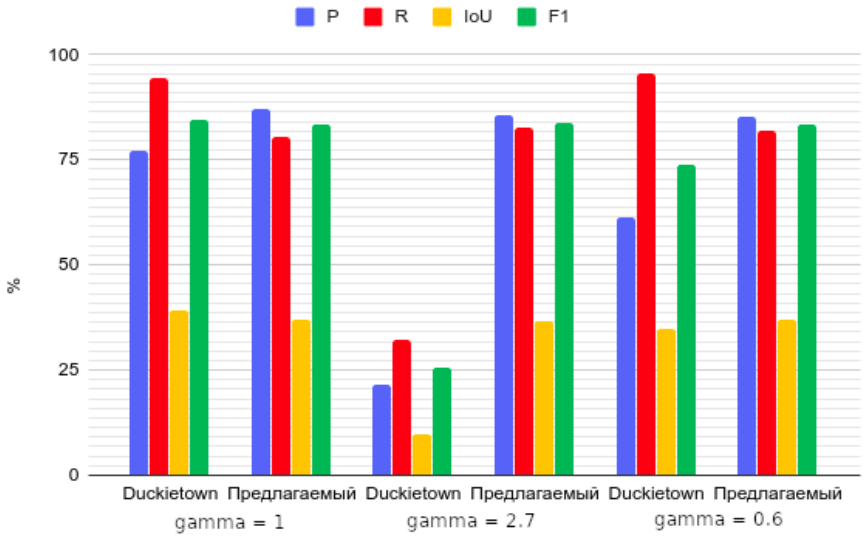


Рис. 4. Результаты сравнения двух алгоритмов, P - точность, R - чувствительность

Как видно из диаграммы на рисунке 4, предлагаемый алгоритм показывает более стабильную работу на всех датасетах. Также, время работы предлагаемого алгоритма составило 0.7 мс, а алгоритм проекта Dukietown - 23.3 мс.

Следующим этапом работы было тестирование предлагаемого алгоритма на открытом датасете Llamas [5]. В ходе работы не ставилась задача определения области интереса (ROI), и при тестировании верхняя часть изображения, на которой изображено небо, отрезалась искусственно. Разработанный алгоритм достиг точности в 35.88% при времени обработки одного изображения 1276x717 пикселей 7.3 мс.

Предлагаемый алгоритм сравнивался с алгоритмом создателей датасета. Создатели датасета оценивают решения основываясь на средней точности P бинарной классификации. На момент написания данной работы лучший результат в секции бинарной классификации описывается в статье. Решение было предложено самими разработчиками датасета, основывается на использовании нейронных сетей, и обеспечивает точность в 43.40% при времени обработки одного изображения 44 мс. При выигрыше в точности в 10% изображение обрабатывается примерно в 6 раз дольше. Более того, время в 44 мс было обеспечено запуском решения на видеокарте Nvidia GeForce 1080 Ti, цена за которую может доходить до 60 тысяч рублей. Таким образом, предлагаемый алгоритм может быть хорошим выбором при ограниченных вычислительных мощностях и жестких требованиях к быстродействию алгоритма.

Основываясь на проведенном анализе существующих решений, был предложен новый алгоритм бинаризации изображения для детекции линий дорожной разметки. На начальном этапе обработки изображения предлагается применить к входному зашумленному изображению фильтр Гаусса и перевести изображение в цветовое пространство CIE Lab, которое обеспечивает разделение яркостной и хроматической составляющих пикселей на изображении. Для увеличения контрастности изображения производится нормализация канала яркости методом MINMAX. Далее интенсивность пикселя в канале яркости рассматривается как случайная величина, распределение которой аппроксимируется нормальным распределением с параметрами μ, σ, которые равны среднему значению и среднеквадратичному отклонению интенсивностей пикселей на изображении. Порог бинаризации рассчитывается на основании параметров μ, σ и коэффициента k, который учитывает размер линий дорожной

разметки на изображении. Для улучшения качества полученной бинарной маски к ней применяется морфологический фильтр.

В качестве развития предложенного метода детекции линий дорожной разметки планируется исследование возможности использования методов постобработки бинарной маски. Для нахождения границ полосы планируется рассмотреть возможность использования алгоритм RANSAC для определения параметров аппроксимирующей прямой границы дорожной полосы, а также алгоритмов кластеризации для уменьшения зашумленности полученной бинарной маски. Учитывая быстродействие разработанного алгоритма, появляется возможность использовать более сложные алгоритмы на этапе постобработки бинарной маски.

Подводя итог, можно сказать, что поставленная задача детекции линий дорожной разметки методами компьютерного зрения была выполнена. В результате работы был разработан алгоритм, устойчивый в разным параметрам освещения, имеющий 3 настраиваемых параметра, а также способный быстро обрабатывать изображения, не требуя при этом больших вычислительных мощностей.

Литература

1. Illumination I.C. on. Recommendations on Uniform Color Spaces-Color-difference Equations, Psychometric Color Terms. Bureau Central de la CIE. 1978.
2. Tani J., Paull L., Zuber M.T., Rus D., How J., Leonard J. and Censi A., Duckietown: an innovative way to teach autonomy // International Conference EduRobotics 2016. Springer. 2016. С. 104–121.
3. Чистяков В. П. Курс теории вероятностей. Наука М., 1987.
4. Menon A., Narasimhan H., Agarwal S. and Chawla S. On the statistical consistency of algorithms for binary classification under class imbalance // International Conference on Machine Learning. 2013. P. 603–611.
5. Behrendt K., Soussan R. Unsupervised Labeled Lane Marker Dataset Generation Using Maps // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2019.

Казакова Евгения Сергеевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы N3453,
направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность,
e-mail: eskazakova7@gmail.com
Викснин Илья Игоревич
Год рождения: 1992
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
к.т.н., н.с.,
e-mail: wixnin@mail.ru

УДК 004.45

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ СРЕДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОДА

Е.С. Казакова
Научный руководитель – к.т.н., н.с. И.И. Викснин

Аннотация
В работе выполняется исследование сред выполнения программ *Java Virtual Machine* и *Common Language Runtime* и *Secure Virtual Machine*, а также методов статического и динамического анализа кода. В результате сформулированы критерии проверки байт-кода и предложена модель безопасности среды выполнения, основанная на реализации данных критериев в генераторе машинного кода, позволяющая минимизировать количество ошибок, не выявленных на этапе анализа исходного кода программ.
Ключевые слова
Среда выполнения, контроль доступа к памяти, безопасность памяти, типобезопасность, статический анализ кода.

Введение

Несмотря на достижения в области компьютерной безопасности, большинство приложений не лишено множества уязвимостей. Одним из основных классов таких уязвимостей являются ошибки безопасности памяти. Их появление обусловлено множеством причин, например, использованием неинициализированных переменных, нулевых указателей, выходом за границы массивов, переполнением буфера. Подобные ошибки часто связаны с ошибками кодирования. Они, в свою очередь следуют из особенностей языков программирования. Использование виртуальных сред выполнения программ, в которые контролируют процесс управления памятью, позволяет минимизировать риски возникновения ошибок безопасности, однако существенная часть системного и прикладного программного обеспечения реализована на языках программирования, компилируемых напрямую в машинный код. Обеспечение контроля доступа к памяти за счет средств виртуализации позволяет минимизировать количество ошибок, возникающих на уровне исходного кода программы из-за некорректного использования средств управления памятью за счет выполнения анализа байт-кода.

1. ВИРТУАЛЬНЫЕ СРЕДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММ

1.1. Средства виртуализации *JVM* и *.NET*

Существует множество технологий виртуализации, обеспечивающих частичную или полную эмуляцию аппаратного обеспечения - *Intel VT*, *AMD-V*, операционных систем (контейнеры) - *Docker*, *FreeBSD Jail*, отдельных программных или аппаратных интерфейсов. Одним из распространенных подходов к разработке ПО является использование виртуальных машин уровня приложений, например, *Java Virtual Machine* (*JVM*), *Virtual Execution System* (реализации *VES* - *CLR*, *CoreCLR*). Данные системы реализуют подход двухэтапной компиляции, как показано на рис. 1.

Рис. 1. Двухэтапная модель компиляции

Обеспечение безопасности кода на уровне среды выполнения предполагает реализацию механизмов: безопасности типов (*type safety*), автоматического управления памятью (для контроля выделения и освобождения памяти, проверки корректности доступа к аллоцированным объектам), контроля над потоком управления. В случае возникновения типичных ошибочных сценариев в ходе выполнения программы (например, обращения по нулевому указателю, некорректного преобразования данных с точки зрения их типов, нарушения целостности стека вызовов) среда выполнения автоматически выбросит исключение, остановив программу. В случае, когда программа компилируется напрямую в машинный код и отсутствуют перечисленные механизмы, программа может более простым образом получить доступ к памяти других процессов, коду уровня ядра операционной системы.

В рамках данной работы рассматриваются реализации подхода двухэтапной компиляции на примере виртуальных машин *JVM*, *CLR*, *SVM* [1, 2]. Данные среды выполнения осуществляют верификацию кода программ на этапе загрузки их в память перед выполнением, на этапе генерации машинного кода, и в случае возникновения некорректных (недопустимых) операций с памятью генерируют исключения. На рис. 2 показана процедура загрузки кода для сред выполнения *JVM*, *CLR*. Символом “*” помечены особенности, реализованные только в *CLR*.

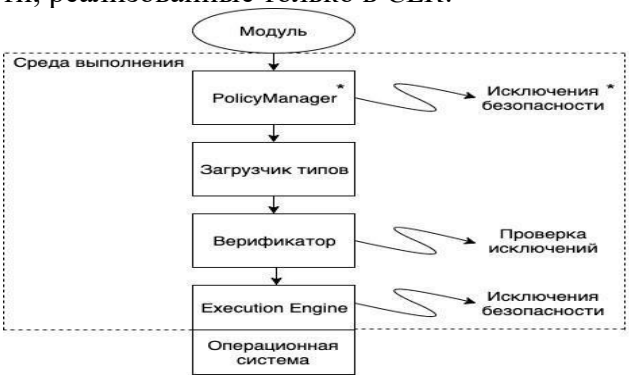


Рис. 2. Модель архитектуры среды выполнения

Помимо контроля над операциями с памятью, среда выполнения может допускать или запрещать выполнение каких-либо операций – это определяется политиками безопасности. Политики безопасности представляют собой конфигурацию среды выполнения, могут задаваться в виде аннотаций (атрибутов) в исходном коде программ на *Java*, *C#*. Если программа пытается выполнить действие, противоречащее политике, возникает исключение безопасности.

JVM и *CLR* позволяют разработчикам управлять доступом к определенной функциональности приложения, операционной системы. Однако они не исключают рисков, связанных с эксплуатацией уязвимостей на уровне машинного кода, выполнения кода ядра операционной системы, в которой сами среды выполнения запущены. Одним из сфокусированных на данной проблеме решений является *SVM*, которая представляет собой виртуальную машину с реализацией набора проверок генерируемого машинного кода, позволяющей выполнять код ядра операционной системы.

1.2. Средства виртуализации *Secure Virtual Machine*

SVM – это виртуальная машина на основе компилятора, выполняющая компиляцию кода ядра операционной системы. Все программное обеспечение в системе *SVM* компилируется в виртуальный набор команд на основе *LLVM Intermediate Representation* (*LLVM IR*). В оригинальной *LLVM IR* отсутствуют инструкции для низкоуровневых операций, необходимых ядру операционной системы для выполнения таких задач, как настройка *MMU* и переключение контекста; В виртуальной машине *SVM* используется расширенный набор инструкций *LLVM IR - SVA* (*Secure Virtual Architecture*), которая показана на рис. 3.

Рис. 3. *Secure Virtual Architecture* (*SVA*)

SVA вводит набор низкоуровневых инструкций, часть которого – это набор операций совместно называемых *SVA-OS*, инкапсулирующих все привилегированные аппаратные операции, необходимые ядру. *SVA* также определяет несколько ограничений, которым должны удовлетворять менеджеры памяти ядра, и несколько операций, которые они должны реализовать. Поскольку весь код, включая ядро операционной системы и код приложения, компилируется в *SVA's Virtual Instruction Set Architecture* (*V-ISA*), *SVM* может применять политики безопасности (такие как безопасность памяти и целостность потока управления) для всего кода, вставляя проверки времени выполнения в код при переводе его из виртуального набора команд в собственный набор команд [3]. Но *SVM* использует статический анализ для устранения проверок во время выполнения. Данный подход, добавляет накладные расходы на производительность системы.

2 МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ СРЕДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОДА НА ОСНОВЕ LLVM IR

Согласно двухэтапной модели компиляции программа компилируется в код на промежуточном языке, который в свою очередь, выполняется самой средой. На этой же концепции построена инфраструктура для разработки компиляторов *LLVM*, рис. 4.

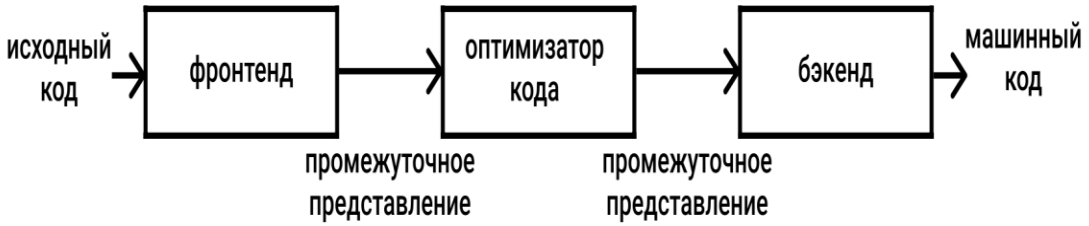


Рис. 4. Двухэтапная компиляция *LLVM*

Двухэтапная компиляция *LLVM* обычно структурирована так:

1. Транслятор-фронтенд, преобразующий исходный код в промежуточное представление.
2. Оптимизатор-конвейер машинно-независимой оптимизации промежуточного представления кода.
3. Кодогенератор-машинно-зависимый бэкенд для генерации машинного кода, выполнения специфических для архитектуры процессора оптимизаций.

Разработка компилятора для оригинальной архитектуры процессора, это, в основном, разработка кодогенератора. Вмешательство в алгоритмы фронтенда, как правило, не является необходимым. Генератор кода LLVM отвечает за преобразование LLVM IR в целевой машинный код. Задача генератора кода состоит в том, чтобы создать наилучший машинный код для любой заданной цели. По этим причинам в своей работе я и добавляю анализ именно в процесс генерации машинного кода.

В данной работе разработана модель безопасности, предписывающая выполнение проверок на уровне промежуточного представления программ, что позволит избежать их реализации отдельно для каждого языка программирования, как это осуществляется во многих существующих решениях. Данная модель (рис. 5) реализована на основе среды выполнения LLVM с использованием её промежуточного представления программ (LLVM IR).

Программные ошибки могут привести к сбоям программ или серьезным атакам на безопасность. Используя техники анализа кода и инструментальное программное обеспечение, при выполнении кода можно избежать программные ошибки.

Рис. 5. Разработанная модель безопасности среды выполнения кода на основе LLVM IR

Среда выполнения использует комбинацию статического анализа и динамической проверки для применения политик при выполнении программ. Верификаторы кода статически проверяют некоторые низкоуровневые свойства кода, необходимые, но недостаточные для безопасности типов, памяти и потока управления, прежде чем разрешить выполнение программ. Другие свойства должны проверяться динамически для обеспечения безопасности кода низкого уровня.

Динамическая *JIT*-компиляция позволяет компилировать промежуточный код напрямую в бинарный во время его выполнения, что существенно увеличивает скорость выполнения. Как вид динамического анализа данный метод позволяет

создавать высоко оптимизированный код и улучшает пиковую производительность и время запуска.

Анализ кода выполняется за счет проверки его соответствия определенным критериям (правилам). Набор правил подразумевает покрытие ошибок определенного класса: проблемы в управлении и использовании памяти (использование “мертвых” указателей, наличие утечек памяти, обращений по нулевым указателям, переполнение буфера, выход за границы массивов), недопустимых арифметико-логических операций, ошибок типизации, использование неинициализированных переменных, некорректного использования библиотечных функций, и других. Применение техник анализа на уровне среды выполнения программ (к промежуточному представлению, например, *CLR*, *LLVM*) позволит гарантировать отсутствие данных ошибок вне зависимости от реализации компиляторов исходного языка.

Именно генератор кода для целевой платформы (таргета) является наиболее трудоемкой и важной, с точки зрения безопасности, задачей при разработке компилятора на основе инфраструктуры LLVM. В процессе генерации машинного кода осуществляются следующие проверки над программой (таблица).

Данные критерии анализа кода позволят выявить заданное подмножество ошибок, приводящих к проблемам безопасности. В настоящее время, из существующих реализаций виртуальных машин у SVM наибольшее количество проверок наиболее опасных и распространенных ошибок в компьютерных программах. SVM проводит статический анализ кода с помощью 13 критериев на уровне исходного кода. Разработанная модель предлагает анализ кода с помощью 20 критериев, которые позволят выявить заданное подмножество ошибок на уровне промежуточного представления, приводящих к проблемам безопасности.

Таблица

Анализ возможностей проверок безопасности сред выполнения

Критерии	JVM	CLR	SVM	Разработанная модель
Деление на ноль, неправильный контроль доступа, мёртвый код, неиспользуемые переменные, переполнение буфера, целочисленное переполнение, выход за границу массива, адрес локальной переменной возвращается из функции по ссылке	+	+	+	+
Разыменование нулевого указателя, мертвые указатели, несоответствия иерархии классов, разыменование параметров без предварительной проверки	-	+	+	+
Неправильное представление о работе функции/класса	-	+	-	+
Неинициализированная переменная	-	-	+	+
Неопределенное поведение, некорректные операции сдвига битов, нарушения рекомендаций по обеспечению безопасности, двойное освобождение ресурсов, отсутствие виртуального деструктора, утечки памяти	-	-	-	+

В качестве показателя эффективности предлагаемых решений в работе принят коэффициент повышения безопасности приложения K

$$K = (1 - K_{current} / K_{my}) * 100\%,$$

где $K_{current}$ - максимальное количество критериев проверки у существующей виртуальной машины; K_{my} - количество критериев проверки у разработанной модели. В нашем случае

$$K = (1 - 13 / 20) * 100\% = 35\%.$$

Следовательно, разработанная модель безопасности среды выполнения кода поможет повысить уровень безопасности на 35%. Применение техник анализа промежуточного представления кода на уровне среды выполнения программ позволит гарантировать отсутствие данных ошибок вне зависимости от реализации компиляторов исходного языка. На рис. 6 представлена разница риска возникновения ошибок безопасности, в зависимости от среды выполнения.

Основываясь на опыте разработки виртуальных сред выполнения программ, таких как *JVM*, *CLR*, *SVM*, дальнейшим развитием идеи проверки кода программ видится следующее. Реализация виртуальной машины должна основываться на концепции управляемого кода (как в *JVM*, *CLR*) [4, 5]. Управляемый код – код, который сопровождается информацией (метаданными), позволяющей во время выполнения программы проверять корректность, допустимость осуществляемых в ней действий. Это применимо, во-первых, к прикладной логике программы, что позволяет выполнять высокоуровневые проверки (связанные с семантикой программы в контексте решения задачи, а также, например, задавать политики безопасности декларативным образом в исходном коде программы). Во-вторых, проверки возможны и применительно к подсистемам, обеспечивающим выполнение программы, в частности, к менеджерам памяти. Наличие метаданных может гарантировать невозможность выполнения программы при возникновении ошибок типизации, а также безопасность доступа к памяти: среда выполнения отслеживает любые потенциально опасные операции (рис. 6).

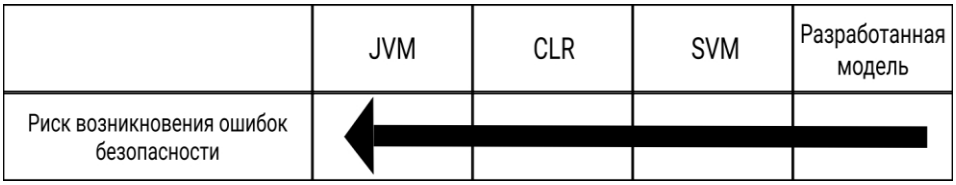


Рис. 6. Разница риска возникновения ошибок безопасности сред выполнения

В то же время, реализация виртуальной среды выполнения программ следует выполнить также в управляемом коде: в таком случае среда выполнения сможет выполнять проверки не только пользовательского кода, но и самой себя, что гарантирует отсутствие перечисленных выше классов ошибок при ее реализации.

Заключение

Современные процессоры становятся все более сложными - повышается их производительность, добавляются новые функциональные возможности. Однако такие улучшения противоречивы: вместе с ними могут появляться критические ошибки безопасности, которые злоумышленники могут использовать для обхода политик

безопасности системы, настроенных на уровне окружения, в котором выполняется программное обеспечение.

Проведенное исследование средств анализа и верификации кода программ на уровне сред выполнения виртуальных машин, таких как *JVM*, *CLR* и *SVM*, показало, что они позволяют разработчикам управлять доступом к определенной функциональности приложения, операционной системы. Однако не исключают рисков, связанных с эксплуатацией уязвимостей на уровне машинного кода, выполнения кода ядра операционной системы, в которой сами среды выполнения запущены. Хотя одним из сфокусированных на данной проблеме решений является *SVM*, которая представляет собой виртуальную машину с реализацией набора проверок генерируемого машинного кода, позволяющей выполнять код ядра операционной системы. Данный подход, добавляет накладные расходы на производительность системы.

На основе результатов исследования сред выполнения виртуальных машин *JVM*, *CLR* и *SVM* и методов статического и динамического анализа были сформированы критерии проверки кода во избежание уязвимостей при кодогенерации *IR* и разработана модель безопасности среды выполнения на основе *LLVM IR*, за счет которой можно повысить уровень безопасности на 35%.

Подход к анализу кода, представленный в работе, применительно к промежуточному представлению кода, позволит реализовать универсальные методы анализа кода, а также выполнять нетривиальные проверки с точки зрения их семантики, что позволит минимизировать количество ошибок, возникающих на уровне исходного кода.

Литература

1. Secure Virtual Architecture: A Safe Execution Environment for Commodity Operating Systems // John Criswell, Andrew Lenharth, Dinakar Dhurjati, Vikram Adve. — Нью-Йорк: SOSP’07, 2007. с. 351-366.
2. ECMA International. Standard ECMA-335: Common Language Infrastructure (Second Edition) [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-335.htm. свободный (дата обращения: 14.01.2020).
3. A Software Solution for Hardware Vulnerabilities // K. Dharsee, E. Johnson, J. Criswell. IEEE Cybersecurity Development: 2017. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/do803, свободный (дата обращения: 14.01.2020).
4. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C# //Рихтер Джеффри. 4-е изд. Санкт-Петербург: 2013.
5. LLVM: A Compilation Framework for Lifelong Program Analysis and Transformation. // Lattner C., Adve V. Сан-Хосе: Int’l Symp. on Code Generation and Optimization. 2004.

Плотникова Дарья Анатольевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
студент группы Р3473,
направление подготовки: 44.03.04 – Профессиональное обучение
e-mail: daria2014plotnikova@yandex.ru
Спиридонова Анна Михайловна
Год рождения: 1982
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
ст. преподаватель (квалификационная категория «старший преподаватель»),
e-mail: spiranna@list.ru

УДК 004.928

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВИДЕОМЭППИНГА ДЛЯ ВЫСТАВКИ «КОГДА ДЕРЕВО СТАНЕТ КАМНЕМ» МАСТЕРСКОЙ М.К. АНИКУШИНА

Д.А. Плотникова
Научный руководитель – ст. преподаватель А.М. Спиридонова

Работа выполнена в рамках темы НИР №107824 4682079 «Разработка и создание видеомэппинга для выставки «Когда дерево станет камнем» мастерской М.К. Аникушина».

Аннотация
В ходе работы разработан сценарий видеомэппинга для выставки мастерской М.К. Аникушина, затрагивающей вопрос времени и природы в жизни человека. Были созданы раскадровка, аниматик и сам видеоконтент, учитывающий особенности проецируемой плоскости (большая система окон). Данный видеомэппинг создан для демонстрации на акции «Ночь музеев» или различных мероприятиях музея, проект может мотивировать зрителей на размышление над вопросами, поднятыми выставкой, а также способствовать интересу к современной скульптуре и графическим технологиям.
Ключевые слова
Видеомэппинг, графические технологии, анимация, сценарий, выставка, искусство.

В настоящее время современная скульптура важна не только как вид искусства и культурное наследие человека, но и как способ наставления людей на размышление о тех или иных вопросах, которые важны в современном обществе. Так, выставка «Когда дерево станет камнем» мастерской М.К. Аникушина отражает различные размышления современных скульпторов о времени. Каждый экспонат выставки тем или иным образом говорит нам о времени, о том, как оно может выглядеть, какое оно на ощупь и каково его звучание. В экспозиции представлено множество интерактивных экспонатов, которые помогают посетителям проникнуться идеей выставки и вместе с авторами поразмышлять о том, что значит время для каждого из нас.

Так, музею был необходим видеомэппинг [3] для акции «Ночь музеев», соответствующий тематике выставки и удовлетворяющий техническим требованиям:

– видеомэппинг должен учитывать геометрические особенности поверхности, на которую будет производиться проекция (одно окно 198,2 см × 246,5 см, система

окон 991 см × 740 см);

– видеомэппинг должен коррелировать с тематикой выставки;
– длительность ролика 4-5 минут;
– необходимо подходящее музыкальное сопровождение.

Основываясь на тематике выставки, которая была изучена во время экскурсии в музее, а также поиска дополнительной информации, были найдены и рассмотрены аналоги наиболее близкие к тематике выставки. Для того, чтобы наиболее объективно проанализировать найденные аналоги, были выдвинуты следующие критерии оценки:

1. Внутреннее пространство (мэппинг должен быть внутри здания, а не на фасаде, так как это является одним из технических требований).
2. Поверхность проецирования (предпочтение отдаётся большим плоским поверхностям, потому что для создаваемого мэппинга будет использована подобная плоскость).
3. Длительность (необходимое время видеомэппинга должно составлять около 4-5 минут).
4. Аудио (необходимо звуковое сопровождение для большего воздействия на зрителя и вовлечённости аудитории).
5. Тематика (идейная составляющая должна быть связана с темами времени, пространства, изменчивости, природы, изменчивости текстур. Так как в тематике выставки «Когда дерево станет камнем» соединяются данные смысловые аспекты).

Для каждого критерия будут использованы одна из двух единиц оценки:

– соответствует критерию (+),
– не соответствует критерию (-).

Однако в пятом критерии тематики будет использована шкала от 1 до 3, где:

- 1 – полное несоответствие тематике,
- 2 – тематика раскрыта частично/ использованы элементы тематики,
- 3 – соответствие тематике.

Оценка аналогов

В ходе поиска аналогов, были рассмотрены различные существующие на данный момент видеомэппинги, однако полного соответствия поставленным критериям найти не удалось. Далее представлены наиболее удачные примеры:

1. Компания «Сила света», проект для ДЛТ.

Панорамная 360-градусная проекция на стенах атриума была завершена световым дизайном. Техническое решение помогло сохранить уникальный облик исторического здания. Контент соединял в себе трехмерные иллюзии и модные визуальные эффекты, сочетающие в себе игру различных материалов, текстовое сопровождение и визуальную яркость.

2. Цветочный видеомэппинг от студии «WOW».

Данный видеомэппинг представляет собой танец цветов, показывающий процесс их роста, изменчивость и природную красоту. В данном примере можно видеть, как в представлении совместили видеомэппинг и танец девушки, движения и ритм танца подчёркиваются элементами видеомэппинга. Данный пример затрагивает природные мотивы, чем становится немного ближе к нашей тематике, однако не полностью отражает её суть.

3. «Цветы» видеомэппинг на выставке в Токио.

Проект FLOWERS является интерактивной выставкой, где посетители могут узнать информацию не только о цветах, но и о их тесной связи с искусством. Один из главных мэппингов представляет собой книгу, страницы которой рассказывают короткий сюжет о красоте цветов. Данный проект является визуально ярким и близким

к тематике. Однако сам видеоряд довольно короткий, что не соответствует требованиям технического задания.

4. APIMONDIA 2017 Шоу открытия конгресса.

Данный проект является открывающим видео конференции для компании Huawei. В начале видеомэппинга есть графические элементы, которые подчёркивают геометрические особенности поверхности проецирования, а далее присутствует видеомонтаж съёмок. Начало данного видео хорошо демонстрирует интересную работу с различными фигурами на поверхности, однако не устраивает по тематике и продолжительности.

5. «Axioma» видеомэппинг на фестивале в Барселоне.

Данный мэппинг был создан на фасаде здания, что исключает соответствие по критерию «внутреннее пространство», однако в данном примере очень хорошо продемонстрирована работа с объёмом. Контент является высококачественным продуктом для масштабного мероприятия, поэтому время видеоряда значительно больше, чем в прописанных выше критериях. Однако визуальное решение этого видеомэппинга является очень хорошим, так как подчёркивает игру с пространством, заставляя зрителя усомниться в реальной форме фасада.

Подводя итоги рассмотренных аналогов, можно создать сравнительную таблицу.

Таблица

Сравнение аналогов

Аналоги\критерии	Внутреннее пространство	Поверхность проецирования	Длительность	Аудио	Тематика
Проект для ДЛТ, Сила Света	+	+	+	+	1
Видеомэппинг студии WOW	+	-	+	+	2
«Цветы» выставка в Токио	+	+	-	-	2
APIMONDIA	+	+	-	+	1
Axioma	-	+	-	+	3

Таким образом, проанализировав данные полученной таблицы, можно сделать вывод, что не существует аналога, полностью удовлетворяющего технические требования и в то же время раскрывающего тематику выставки. Следовательно, создание оригинального сценария, включающего в себя смысловые особенности выставки, а также предусматривающего особенности проецируемой плоскости, является необходимым.

Чтобы грамотно выполнить работу по разработке и созданию видеомэппинга было необходимо разработать несколько литературных сценариев с мудбордами для дальнейшего обсуждения и согласования с администрацией музея, затем провести обзор программного обеспечения и выбрать необходимые инструменты, после чего создать раскадровку и на её основе создать аниматик с выбранной музыкой для чёткого понимания продолжительности каждой сцены. Далее необходимо создать каждую сцену, осуществить монтаж, постобработку и финальный рендер.

На этапе разработки сценариев были придуманы и высланы администрации музея четыре литературных сценария.

Первый сценарий был посвящен танцу цветов под симфонию П.И. Чайковского

«Вальс цветов», чтобы раскрыть, растительную, цветочную и природную тематику выставки.

Второй сценарий был основан больше на экспонатах, используемых в выставке, в большей степени к экспонату «Башня времени». Это была история о шарике, который преодолевал различные препятствия для достижения цели – это говорит о том, как много приходится преодолеть человеку на жизненном пути.

Третий сценарий показался очень длинным, поэтому был отвергнут, но он отображал почти все вопросы выставки, связанные с временем, пространством, природой, разрушением.

Теперь перейдем к выбранному сценарию. Четвёртый сценарий затрагивает тематику времени, природы, изменчивости, потому что планировалось много моментов, когда что-то разрушается и строится заново. Также в данном сценарии присутствует несколько отсылок к экспонатам выставки.

Таким образом после выбора сценария были определены инструментальные средства, наиболее подходящие для его реализации: Adobe After Effects [2] для создания основного видеоряда и анимации, Trapcode Particular для создания системы частиц и работы с ними, Newtone 3 для After Effects, так как является средой для имитации физики взаимодействия объектов в двухмерном пространстве, Saber для создания имитации природных эффектов, Sapphire для создания дополнительных эффектов сложного свечения и бликов, Autodesk Maya для создания трёхмерного контента и его анимации, Adobe Media Encoder для рендера всех видеоматериалов. Также некоторые из них были найдены в процессе работы.

Первым этапом после утверждения сценария было создание раскадровки (рис. 1) по основным этапам сюжета [1]. Впоследствии весь ролик был разбит на 7 сцен, каждая из которых создавалась отдельно в целях экономии ресурсов, а затем все сцены склеивались. Затем с помощью раскадровки был создан аниматик, чтобы четко понимать продолжительность каждой сцены. Была выбрана спокойная инструментальная музыка.

Также была создана схема системы окон (рис.2) с учётом их пропорций. Данная сетка использовалась в дальнейшем при создании сцен, где необходима работа с геометрией проецируемой плоскости.

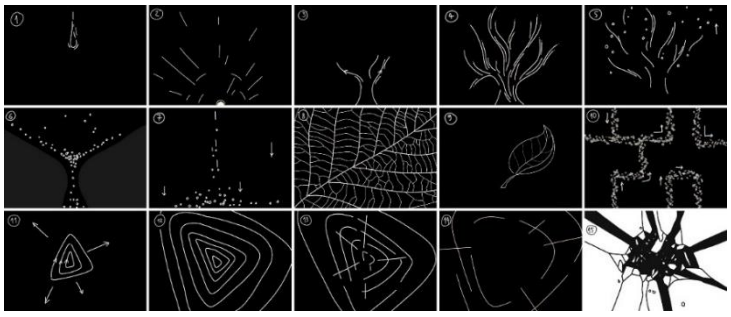


Рис. 1. Раскадровка

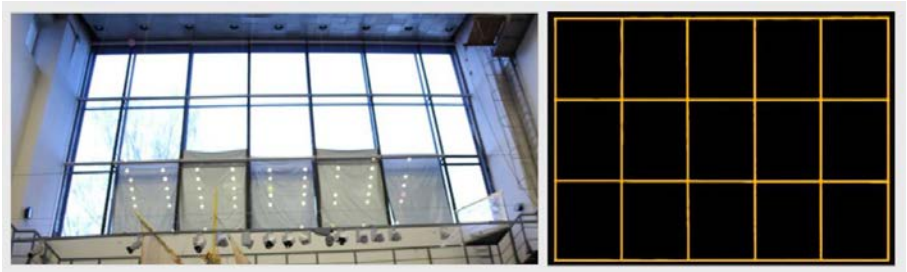


Рис. 2. Система окон и её схема

Первая сцена была создана с помощью эффекта Particular System для создания парящих в воздухе частиц. Для создания падающей звезды был использован Saber с редактированием интенсивности и формы спецэффектов.

Сцена с деревом была одной из самых сложных. Для её разработки использовался плагин Trapcode Particular, для работы со сложными спецэффектами. Линии, из которых прорисовывается дерево являются потоком частиц с изменением радиуса на начало и конец траектории движения. Полностью прорисованное дерево состояло из трех отрендеренных файлов на прозрачном фоне. Для того, чтобы создать эффект распыления, композиция, содержащая всё дерево, была продублирована. Так, информация из второго слоя служила материалом для создания частиц, что позволило создать частицы такого же цветового спектра, как и дерево.

Для создания сцены с песочными часами использовалась система Newton, имитирующая физику взаимодействия объектов. В этой среде были присвоены статусы статического и динамического объекта силуэту песочных часов и крупицам соответственно. В дальнейшем производилась обработка контента и добавление необходимых эффектов

В ходе создания сцены с прорисовывающимся листом была создана векторная версия листа. Информация, содержащаяся в кривых импортированного объекта, была использована как маска для слоя, которая служила траекторией для эффекта Saber. Эффект был настроен так, чтобы передать разную толщину элементов листа.

Для создания сцены с частицами, бегающими по граням был сначала создан отдельным слоем путь, а затем к нему привязывались слои со светящимся шариком и с системой частиц. Для создания системы частиц использовался Particular World чтобы создать эффект объема тоннеля частиц.

Сцена с порталом создавалась в программе Maya. К объектам был применён светящийся материал. Для анимации прорисовывания была использована анимация точек. Также была произведена настройка камеры и анимация её пролета и вращения сквозь тоннель. В After Effects была осуществлена постобработка (так как рисовать первый треугольник должна светящаяся частица из прошлой сцены), добавлены летящие частицы.

Для создания последней сцены также использовалась Maya. В соответствии разлиновкой окон были созданы рамы и сами окна. Для разбиения окон на сегменты была использована функция Shutter в разделе FX. А для имитации физики падения был использован плагин Bullet. Постобработка производилась в After Effects, был настроен цвет внутренних теней, вместо черного сделан синий, а также добавлены летающие частицы, которые появляются по мере разрушения.

На этапе постобработки и финального рендера были собраны все видеофайлы (рис. 3) предыдущих сцен, добавлены переходы, а также музыка. Итоговая продолжительность ролика составила 4мин 5 сек.

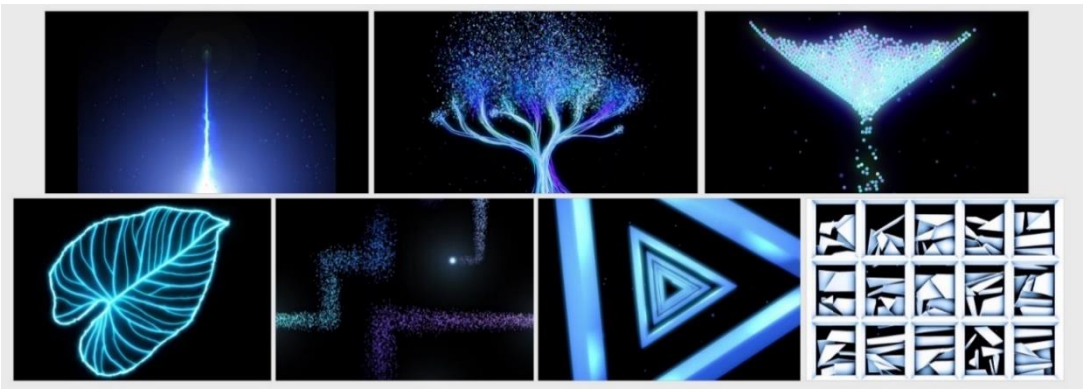


Рис. 3. Кадры из видеомэппинга

Стоит отметить, что каждая из созданных сцен имеет отсылку к тому или иному экспонату выставки (рис. 4). Такая концепция позволяет провести параллель между видеомэппингом и самой выставкой, показывая их взаимосвязь.

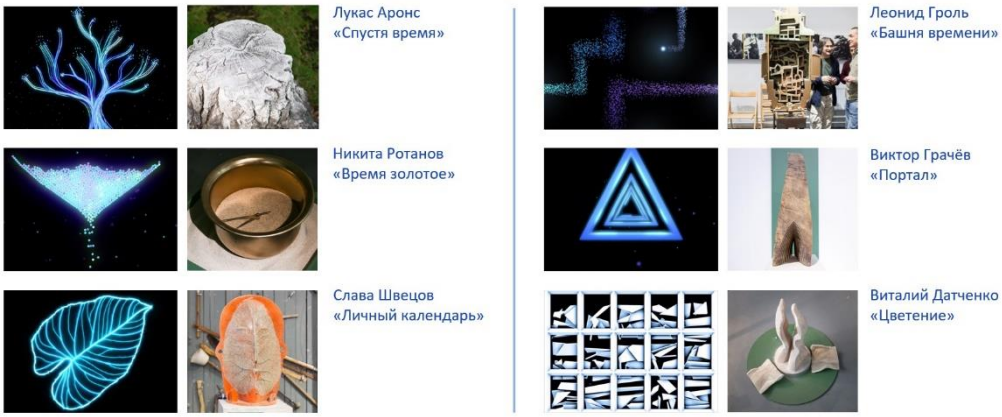


Рис. 4. Отсылки к экспонатам

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан и создан видеомэппинг для выставки современной скульптуры «Когда дерево станет камнем» мастерской М.К. Аникушина, который соответствует всем установленным техническим требованиям. В ходе реализации проекта были выполнены все поставленные задачи. Работа подразделялась на три основных этапа: этап разработки сценария, этап проектирования и этап реализации проекта.

По мере создания проекта были получены новые полезные знания и умения по работе с визуальными эффектами, а также по работе с системой частиц, имитацией физики взаимодействия объектов.

Данный видеомэпппинг может использоваться не только на международной акции «Ночь музеев», которая перенесена на ноябрь, но также и в рамках различных мероприятий музея, так как является тематически связанным с идеей выставки и органично вписывается в общую концепцию выставки, которая продлится до конца 2020-го года. Также данный проект может мотивировать зрителей на дальнейшее размышление над вопросами, поднятыми на выставке, а также может способствовать интересу как к искусству современной скульптуры, так и к сфере графических технологий.

Литература

1. Раскадровка: 500 руководств и ресурсов [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL:// http://www.cinepromo.ru/raskadrovka-500-rukovodstv-i-resursov.html (дата обращения: 10.03.2020).
2. Райтман М. “Adobe After Effects CC. Официальный учебный курс”. 2014. 432 с.
3. О 3D mapping 'от А до Я' | Удивительный мир 3D mapping [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mapping3d.ru/3d-mapping-ot-a-do-ya (дата обращения: 20.02.2020).

Рогатюк Анна Юрьевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы №B3432,
направление подготовки: 16.03.01 – Техническая физика,
e-mail: anyuanyua09@gmail.com
Аксарин Станислав Михайлович
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.ф.-м.н, доцент,
e-mail: staksar@gmail.com

УДК 535.015.53.096

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИРОЭФФЕКТА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛНОВОДА В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

А.Ю. Рогатюк
Научный руководитель –к.ф.-м.н. С.М. Аксарин

Аннотация
В работе исследовалось влияние пироэлектрического эффекта на возникновение оптических потерь в интегрально-оптическом фазовом модуляторе за счет накопления электрического заряда на полярных гранях кристалла ниобата лития. Эксперимент показывает возникновение сильных оптических потерь вплоть до полного исчезновения оптической мощности на выходе волновода.

Ключевые слова
Пироэлектрический эффект, оптические потери, интегрально-оптический фазовый модулятор, ниобат лития, волновод.

В последнее десятилетие произошло существенное увеличение производства устройств, основанных на волоконно-оптических элементах. Данные приборы имеют высокую точность измерения [1]. Однако, благодаря стремительному росту развития информационно-измерительных систем, задача по улучшению точностных характеристик оптоволоконных приборов остается актуальной.

Повышению точности измерения ряда современных оптических информационных систем способствует повышение эффективности высокочастотной модуляции света. Основным используемым электрооптическим материалом для создания интегрально-оптических модуляторов является ниобат лития (LiNbO3), так как ниобат лития обладает сочетанием уникальных свойств: широкое окно прозрачности, высокий электрооптический коэффициент, низкие оптические потери [2]. Однако при изменении температуры кристалла происходит изменение его собственной поляризации, в результате чего в нем образуется электрическое поле. Данное явление носит название пироэлектрического эффекта (пироэффект).

Описываемое явление оказывает существенное влияние на работу интегрально-оптических модуляторов, в частности, фазовых модуляторов. Фазовый модулятор на основе ниобата лития образован нанесенными на кристалл металлическими электродами, сформированными в области разветвляющихся волноводов (выходных плеч) разветвителя. При подаче на электроды электрического напряжения вследствие того, что кристалл ниобата лития обладает линейным электрооптическим эффектом,

происходит изменение показателя преломления материала волновода и фазы проходящих через него световых волн.

Таким образом, образующееся вследствие пироэффекта поле оказывает влияние на волноводы, нанесенные на кристалл, что вносит значительный вклад в мощность проходящего по ним сигнала [3]. Данное явление было описано в ряде работ [4, 5], однако оно недостаточно хорошо изучено в части влияния на модуляторы с титан-диффузионными волноводами.

Примером устройства, в котором кристалл ниобат лития используется в качестве основы для интегрально-оптического фазового модулятора – волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Данный прибор объединяет в себе передовые разработки в части конфигурации оптической схемы, основ обработки и модуляции оптического сигнала. Помимо определения параметров курса, направления, современные навигационные системы так же используются и для мгновенного вычисления положения объекта в пространстве. Поэтому сигнал с ВОГ должен обладать высокой точностью измерения.

Одним из главных требований к волоконно-оптическому гироскопу является сохранение работоспособности в широком диапазоне температур и стабильность параметров волноводных характеристик. Следовательно, исследование влияния пироэлектрического эффекта на изменение оптических потерь в титан-диффузионном волноводе сформированного в кристалле ниобата лития является актуальной задачей. Исследование данного явления поспособствует улучшению точностных характеристик не только волоконно- оптического гироскопа, но и других приборов, основой для интегрально-оптических модуляторов которых является кристалл ниобат лития.

Методика проведения исследования заключается в анализе характера изменения мощности излучения, проходящего по волноводам интегрально-оптического фазового модулятор, при изменении температуры. Для исследования была собрана схема, состоящая источника излучения, контроллера поляризации, поляризатора, фотоприемника и исследуемого образца, помещенного на элемент Пельтье, с помощью которого осуществлялось изменение температуры образца. Длина волны источника излучения 1550 нм. Ниже представлена схема экспериментальной установки (рис. 1).

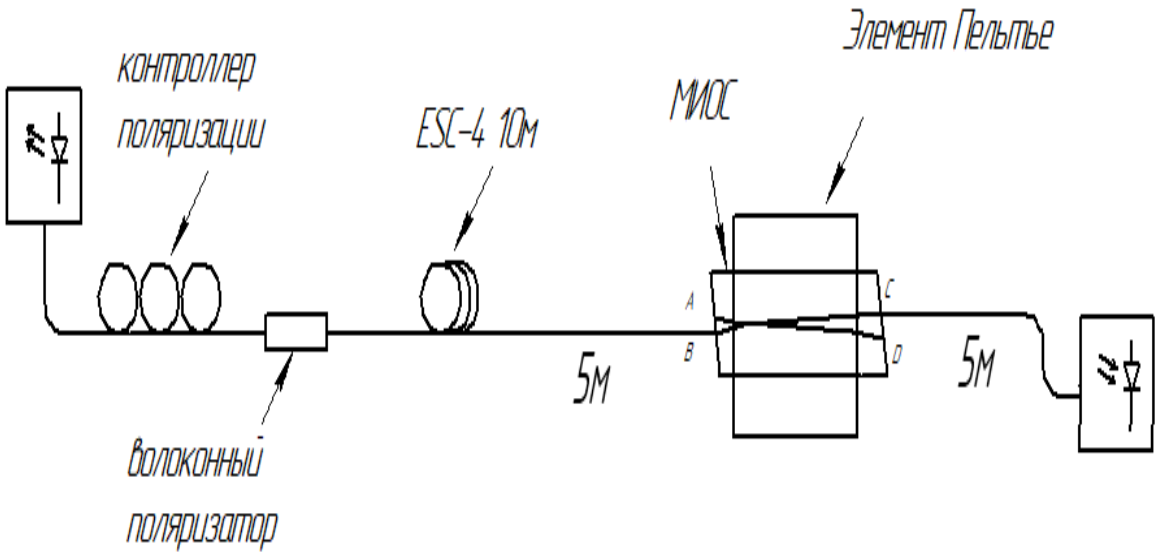


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В процессе работы были проведены эксперименты с аналогичными временными условиями изменения температуры (рис. 2).

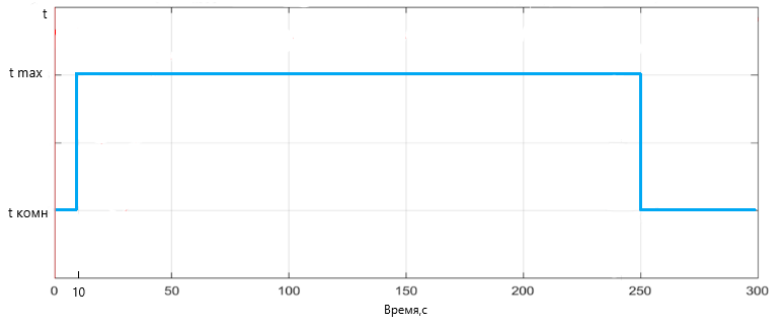


Рис. 2. Характер изменения температуры элемента Пельтье от времени

Ниже представлен график, отражающий общий характер изменения мощности излучения от изменения температуры образца (рис. 3).

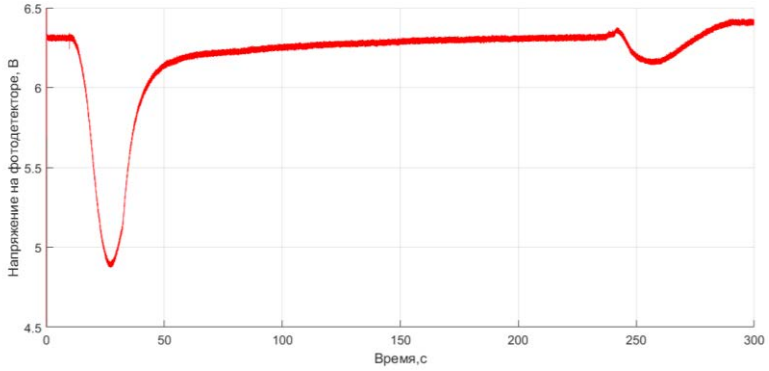


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от времени
при изменении температуры образца. Нагрев на 10с, охлаждение на 250 с, $\Delta t = 5^{\circ}C$

В процессе проведения ряда аналогичных и повторных экспериментов по изменению температуры, был выявлен общий характер изменения мощности от изменения температуры. Графики показывают, что при нагреве образца наблюдается резкое падение мощности сигнала. Далее, при постоянной температуре, оптическая мощность возрастает до своего первоначального значения. При охлаждении образца наблюдается увеличение мощности, падение и последующая релаксация.

На основе полученных результатов в ходе работы было предположено, что при нагреве МИОС вследствие пироэффекта электроды, являясь проводниками, приводят к перераспределению поля и созданию сильных значений напряженностей электрического поля в зазорах с волноводами (рис. 4). Это в свою очередь приводит к нарушению волнового распространения вследствие электрооптического эффекта. При этом наблюдается падение мощности сигнала.

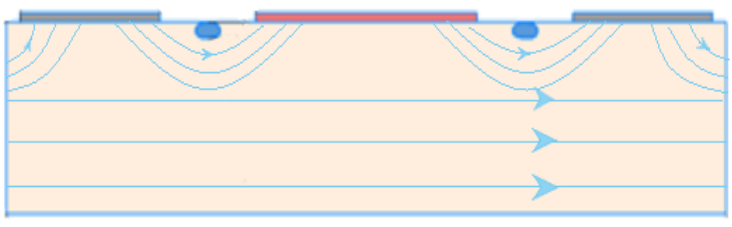


Рис. 4. Образование электрического поля в зазорах с волноводами

Так же пироэффект приводит к частичной миграции свободных электронов с боковых граней на электроды, и, при достаточно высокой температуре возможно резкое образование скопления зарядов на электродах, что способствует пробойной миграции зарядов на поверхности кристалла, тем самым вызывая резкое изменение поля Для подтверждения предположения осуществлена промазка боковых граней проводящей пастой. Это позволило увеличить концентрацию электронов за счет их объединения на боковой грани и обеспечения возможности последующей миграции на электроды (рис. 5).

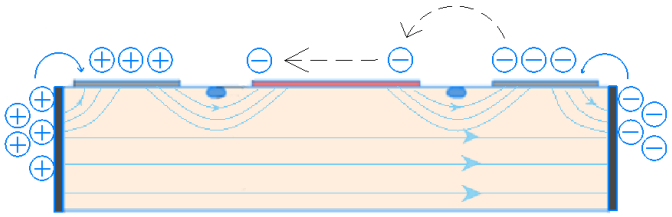


Рис. 5. Пробойная миграция свободных зарядов на поверхности образца

Нагрев образца с нанесённой на боковые грани токопроводящей пастой привел к образованию скачков мощности (пики на графике), что свидетельствует о возникновении резкого изменения электрического поля в волноводе образца (рис. 6)

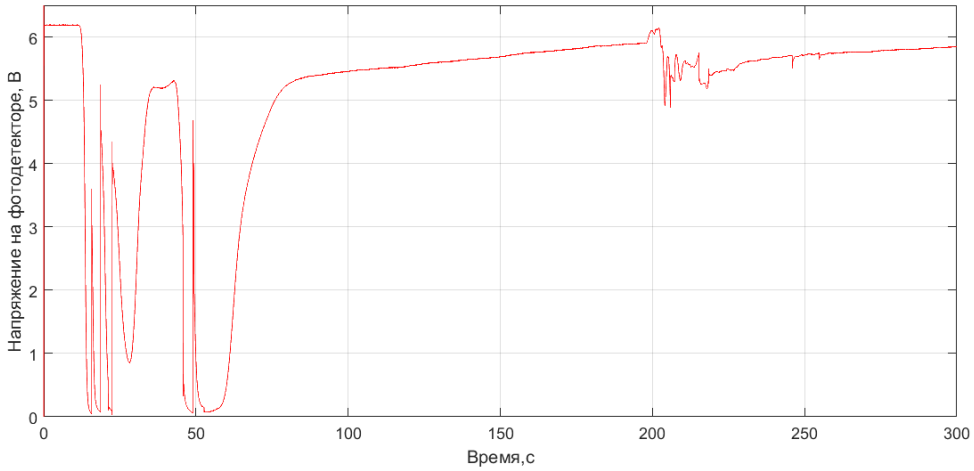


Рис. 6. Зависимость мощности излучения от времени при изменении температуры образца с промазанными боковыми гранями. Нагрев на 10с, охлаждение на 200 с, $\Delta t = 7\,^{\circ}C$

Данное явление вызвано спонтанной миграции зарядов между электродами за счет поверхностного пробоя под действием более высокого заряда.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы было проведено исследование влияния пироэлектрического эффекта на оптические свойства волновода в кристалле ниобата лития. Для этого были проведены: литературный обзор, разработка и сборка оптической установки и проведены экспериментальные измерения, в результате которых получено, что:

- при повышении температуры происходит резкое падение мощности вплоть до полного исчезновения оптической мощности с последующей релаксацией;
- охлаждение приводит к эффекту переменного изменения мощности, что связано с различной природой возникновения зарядов при охлаждении и нагреве сегнетоэлектрика;

− при достаточно сильном изменении температуры () образуются резкие скачки мощности. Данное явление обусловлено пробойной миграцией свободных зарядов, возникающих на боковых гранях вследствие пироэлектрического эффекта.

Причина оптических потерь в волноводе при пироэлектрическом эффекте до конца не выявлена. В дальнейший план работы входит исследование возникновения и роста дефектов в структуре ниобата лития вследствие пироэлектрического эффекта, которые могут вносить вклад в явлении падения оптической мощности.

Литература

1. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета». СПб: Политехника. 2018. 187 с.
2. Лебедев В.В. Исследование высокочастотной и сверхвысокочастотной модуляции оптического излучения в волноводных структурах на основе ниобата лития. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.03/ Лебедев Владимир Владимирович. СПб. 2016. 126 с.
3. Kato N., Motorhio T., Ichikawa T., Ito H., Hioki T., Noda S. All-optical modulation with anomalous photovoltaic film on a Ti:LiNbO3 waweguide modulator // APPLIED OPTICS. 1997. pp. 7870 –7875.
4. Фам М.А. Исследование физических аномалий в монокристаллах LiNbO3. дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.04/ Фам Май Ан. Волгоград. 2014. 100 с.
5. Буш А.А. Пироэлектрический эффект и его применения. Учебное пособие / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)». М. 2005. 212 с.

Романова Анна Викторовна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика,
e-mail: anromanna98@gmail.com
Рождественский Юрий Владимирович
Год рождения: 1958
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
д.ф.-м.н., профессор,
e-mail: rozd-yu@mail.ru

УДК 53.043

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ В РАДИОЧАСТОТНЫХ ЛОВУШКАХ

А.В. Романова
Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Ю.В. Рождественский

Аннотация
В настоящей работе рассмотрено формирование упорядоченных кулоновских структур в линейной квадрупольной ионной ловушке. Представлено математическое моделирование формы эффективного потенциала в зависимости от длины ловушки. Показана зависимость структуры ионных кристаллов Ca^+, локализованных в ловушке предложенной конфигурации, от формы эффективного потенциала. Рассмотрено формирование кулоновских структур из сферических микрочастиц CaF_2.
Ключевые слова
Линейная ионная ловушка, локализация заряженных микрочастиц, математическое моделирование, кулоновские кристаллы, эффективный потенциал.

Кулоновские кристаллы – упорядоченные структуры, формирующиеся из заряженных частиц при их локализации и охлаждении до температур меньше 10 мК. Существующая на настоящий момент теория обладает рядом недостатков: например, учитывается взаимодействие только между ближайшими соседями по аналогии с твердым телом, когда в реальном кулоновском кристалле наблюдается взаимодействие каждого элемента структуры с каждым [1]. Поэтому такая теория неприменима для описания формирования сложных трехмерных структур. Кроме того, образование кулоновских кристаллов из микроразмерных заряженных частиц ранее не было исследовано. Неизвестно, существуют ли устойчивые конфигурации, как в случае ионных кристаллов. Также не изучено влияние дисперсии (масс, зарядов, размеров) на формирование кулоновских кристаллов. В настоящей работе предложен новый способ анализа формирования кулоновских кристаллов, основанный на рассмотрении формы эффективного потенциала ловушки. Такой подход позволяет описать реальную динамику частиц и применим для изучения формирования трехмерных структур, а также структур из микрочастиц.

Для изучения упорядоченных структур из микроразмерных частиц сперва необходимо подробно рассмотреть процессы охлаждения и фазовых переходов в

ионных кулоновских кристаллах. Рассмотрим линейную ловушку с четырьмя цилиндрическими силовыми и двумя плоскими запирающими электродами. Радиочастотное поле силовых электродов позволяет создать радиальную удерживающую силу в плоскости XY, однако в аксиальном направлении частицы свободно движутся. Поэтому для получения устойчивой локализации необходимо дополнительно ограничивать движение частиц в аксиальном направлении с помощью запирающих электродов, на которые подается постоянное напряжение.

Псведопотенциал, создаваемый четырьмя силовыми электродами, имеет вид

$$U(x,y) = \frac{e^2V^2}{m\omega^2R^4}(x^2+y^2), \tag{1}$$

где e, m – заряд и масса частицы соответственно, V, ω – амплитуда и частота переменного напряжения соответственно, R – радиус ловушки [2].

Над поверхностью плоских запирающих электродов, находящихся на расстоянии $\pm L$ от центра ловушки, формируется потенциал $\Phi_{\text{end}}(x,y,z)$:

$$\Phi_{\text{end}}(x,y,z) = U_{\text{end}} \left\{ 1 \mp \frac{z_\pm}{\pi\sqrt{z_\pm^2 + \left(x^2+y^2+r_{\text{end}}^2\right)}} \times, \right.$$
$$\left. \times \left[\frac{r_{\text{end}}}{\tilde{\rho}_\pm + \sqrt{x^2+y^2}} \Pi(-n_1, C) + \frac{\tilde{\rho}_\pm + r_{\text{end}}}{\tilde{\rho}_\pm - \sqrt{x^2+y^2}} \Pi(-n_2, C) \right] \right\}, \tag{2}$$

где r_{end} – радиус запирающих электродов, U_{end} – величина постоянного напряжения на запирающих электродах, $\Pi([-n_1,-n_2],C)$ – полные эллиптические интегралы третьего рода, $\tilde{\rho}_\pm$, C и $n_{1,2}$ определяются как [3]

$$\tilde{\rho}_\pm = \sqrt{x^2+y^2+\left(z \pm \frac{L}{2}\right)^2};$$

$$C = 4\, r_{end}\sqrt{x^2+y^2} \Big/ \left[\left(z \pm \frac{L}{2}\right)^2 + \left(\sqrt{x^2+y^2} + r_{end}\right)^2 \right];$$

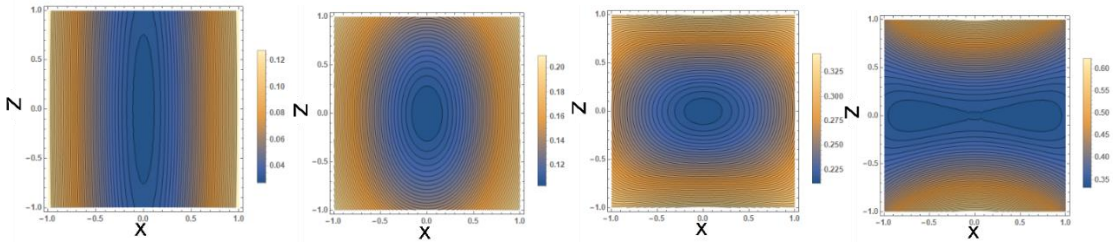
$$n_{1,2} = \mp\, 2\, \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\tilde{\rho}_\pm \sqrt{x^2+y^2}}\,.$$

Очевидно, что в зависимости от геометрии запирающих электродов и конфигурации ловушки (в частности, радиуса запирающих электродов r_{end} и длины ловушки L) будет меняться пространственное распределение потенциала, формирующегося над электродами.

Рассмотрим эффективный потенциал ловушки предложенной конфигурации. Эффективный потенциал представляет собой суперпозицию пространственного распределения потенциалов, формирующихся от силовых и запирающих электродов. Выражение для эффективного потенциала примет вид суммы уравнений (1) и (2):

$$U_{\text{eff}}(x,y,z) = \frac{e^2V^2}{m\omega^2R^4}(x^2+y^2) + e\Phi_{\text{end}}(x,y,z), \tag{3}$$

Сечения эквипотенциальных поверхностей при различных значениях нормированной на R длины ловушке L изображены на рис. 1(а–г). Прочие параметры принимаются равными.



(а) (б) (в) (г)

Рис. 1. Сечения эквипотенциальных поверхностей эффективного потенциала в поперечном сечении (XZ) линейной ловушки при (а) $L = 12$; (б) $L = 6$; (в) $L = 4$; (г) $L = 3$

Как видно из рис. 1(а–г), при $L \gg R$ эффективный потенциал не претерпевает существенных изменений и обладает минимумом в центре ловушки. При уменьшении L вид эффективного потенциала изменяется. При $L = 3$ наблюдается «расщепление» эффективного потенциала с образованием двух потенциальных минимумов. Центральное положение при этом дестабилизируется.

Рассмотрим, как изменение формы эффективного потенциала влияет на структуру кулоновских кристаллов. Пусть в линейной ловушке локализовано N заряженных частиц с зарядами e_i, массами m_i, где $i \in [1, N]$. С учетом уравнения (3), потенциальная энергия частицы примет вид

$$W(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) = \sum_{i}^{N} \left(\frac{e_i V cos(\omega t)}{R^2}\left(x_i^2 - y_i^2\right) + e_i \Phi_{end}\right) + \sum_{i}^{N}\sum_{j \neq i}^{N} k\frac{e_i e_j}{r_{ij}}, \quad (4)$$

где e_i, e_j – заряд i-го и j-го ионов соответственно, r_{ij} – расстояние между i и j ионом, определяемое как $r_{ij} = \sqrt{\left(x_i - x_j\right)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2 + \left(z_i - z_j\right)^2}$.

Запишем уравнения движения с учетом уравнения (4) и сил линейного трения, возникающих при взаимодействии частицы с охлаждающим лазером:

$$m\ddot{x}_i + \frac{e_i V cos(\omega t)}{R^2} 2x_i - e_i \frac{\partial \Phi_{end}}{\partial x_i} - k\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \frac{e_i e_j \left(x_i - x_j\right)}{\left[(x_i - x_j)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2 + \left(z_i - z_j\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = -\alpha \dot{x}_i ; \quad (5)$$

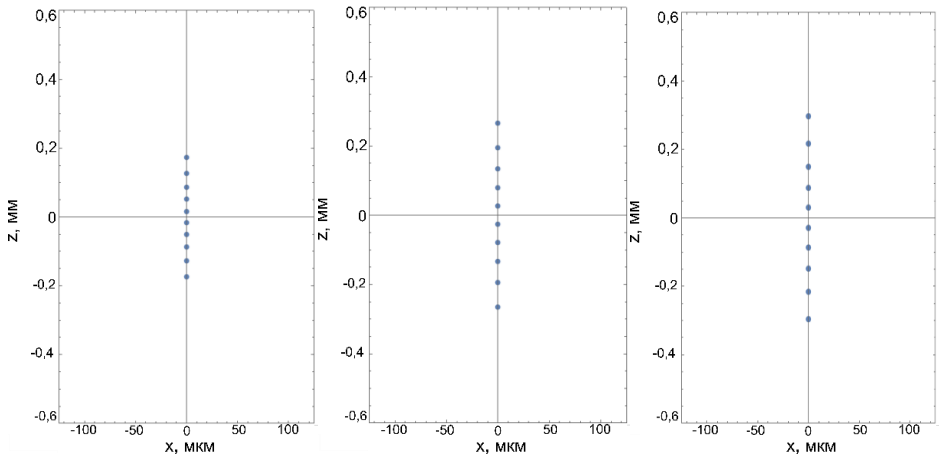
$$m\ddot{y}_i + \frac{e_i V cos(\omega t)}{R^2} 2y_i - e_i \frac{\partial \Phi_{end}}{\partial y_i} - k\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \frac{e_i e_j \left(y_i - y_j\right)}{\left[(x_i - x_j)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2 + \left(z_i - z_j\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = -\alpha \dot{y}_i ; \quad (6)$$

$$m\ddot{z}_i - e_i \frac{\partial \Phi_{end}}{\partial z_i} - k\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \frac{e_i e_j \left(z_i - z_j\right)}{\left[(x_i - x_j)^2 + \left(y_i - y_j\right)^2 + \left(z_i - z_j\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = -\alpha \dot{z}_\iota , \quad (7)$$

где α – эффективный коэффициент трения [4]. Проведем моделирование движения реальных физических систем, используя уравнения (5)–(7).

Рассмотрим систему из $N = 10$ ионов Ca^+ с зарядами $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл и массами $m = 6.64 \cdot 10^{-26}$ кг, локализованных в линейной ловушке с запирающими электродами радиуса $R = r_{\text{end}} = 5$ мм при $V = 100$ В, $\omega = 10 \cdot 10^6$ Гц и $U_{\text{end}} = 5$ В. При $L = 35$ мм наблюдается формирование линейного кулоновского кристалла, что изображено на рис. 2а. Определение линейности кулоновского кристалла будет

представлено ниже.

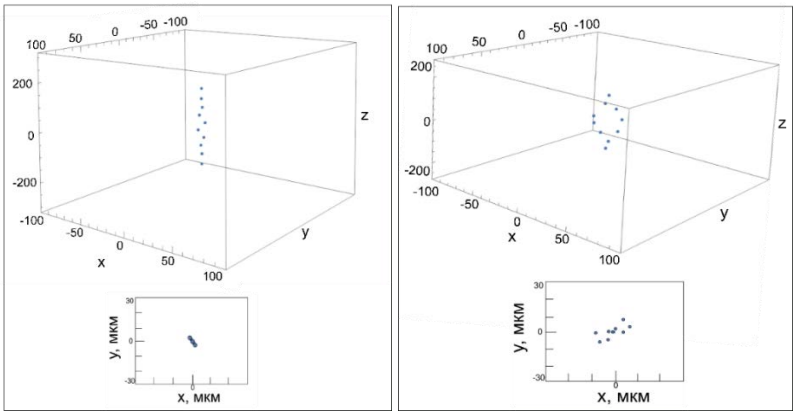


(а) (б) (в)

Рис. 2. Проекция одномерного кулоновского кристалла, формирующегося из ионов Ca^+, на плоскость XZ при $N = 10$ и (а) $L = 35$ мм; (б) $L = 55$ мм; (в) $L = 75$ мм

Из рис. 2(а–в) видно, что в линейном кулоновском кристалле расстояние между центральными частицами меньше, чем расстояние между крайними. Кроме того, с увеличением L увеличивается только длина кулоновского кристалла, при этом структура остается одномерной, что изображено на рис. 2б и рис. 2в.

При уменьшении длины ловушки L наблюдается разрушение симметрии одномерного кулоновского кристалла, так как при этом увеличивается глубина потенциальной ямы и сила кулоновского взаимодействия между частицами. В результате линейная структура становится нестабильной и происходит фазовый переход ожерелье-зигзаг. Такой процесс изображен на рис. 3а: при уменьшении L до значения $L = 32$ мм структура резко переходит от одномерной линейной к зигзагу. При дальнейшем уменьшении L двумерная конфигурация трансформируется в трехмерную структуру, изображенную на рис. 3б. Такие трехмерные конфигурации называются винтовыми или спиральными, так как представляют собой зигзагообразную структуру, закрученную вокруг оси симметрии. В то же время при уменьшении длины ловушки L также изменяется длина кулоновского кристалла – чем меньше длина ловушки, тем сильнее кристалл «сжимается» к центру.



(а) (б)

Рис. 3. (а) формирование зигзага из ионов Ca^+ при $L = 32$ мм: проекция на плоскость XY и трехмерное изображение структуры; (б) трехмерная винтовая структура из ионов Ca^+ при $L = 28$ мм: проекция на плоскость XZ и трехмерное изображение структуры

Изменение структуры кулоновского кристалла соответствует изменению отношения поперечного и продольного размера кристалла. На рис. 4 представлена зависимость отношения поперечного размера кристалла (Δx) к продольному (Δz) от нормированной длины ловушки L. На графике явно видно два фазовых перехода: первый соответствует переходу от линейной цепочки к зигзагу для $L = 4$ второй – от зигзага к трехмерной винтовой структуре при $L = 3$. Кроме того, ожерелью соответствует область значений отношения $\Delta x/\Delta z \leq 10^{-4}$. Таким образом, линейность кулоновского кристалла означает, что поперечный размер структуры не превышает 10^{-4} от продольного.

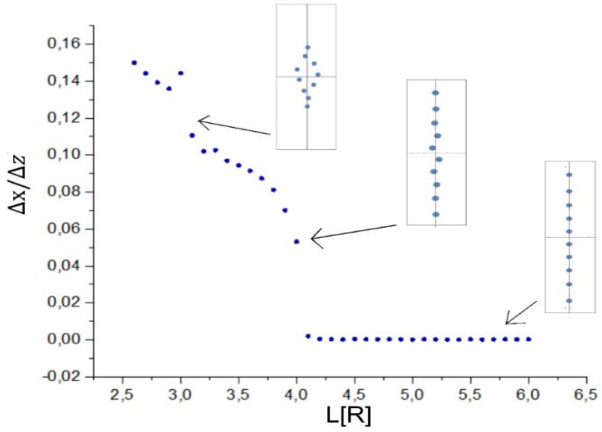
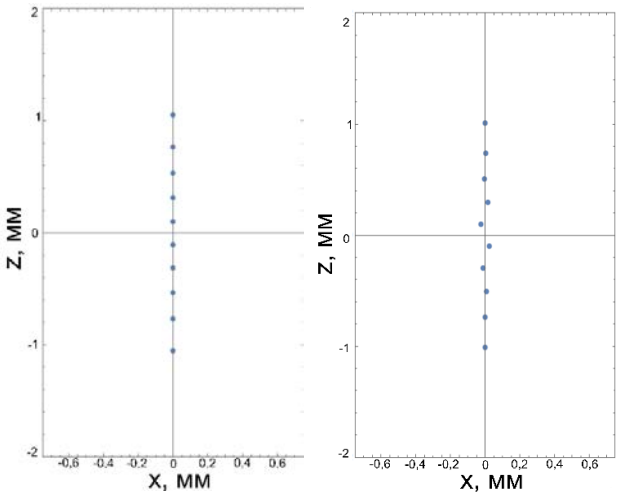


Рис. 4. Зависимость отношения поперечной (Δx) длины ионного кристалла к продольной (Δz) от длины ловушки L (в единицах R)

Представленная выше теория также применима и к микрочастицам. Рассмотрим систему из $N = 10$ одинаковых сферических частиц кристалла флюорита (CaF_2) диаметром 10 мкм с зарядами $e = 1.6 \cdot 10^{-17}$ Кл и массами $m = 5 \cdot 10^{-12}$ кг и проведем аналогичное моделирование при $V = 3$ кВ, $\omega = 50$ Гц, $U_{\text{end}} = 25$ В. Как видно из рис. 5 и рис. 6, микроразмерные частицы в линейной ловушке, как и ионы, способны формировать упорядоченные структуры. Так, при $L = 180$ мм формируется ожерелье, при $L = 173$ мм происходит фазовый переход ожерелье-зигзаг.

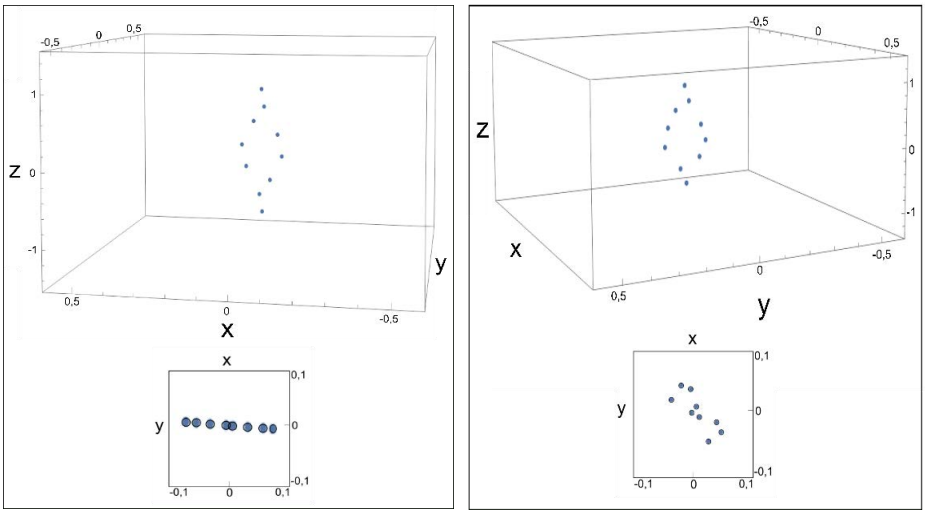


(а) (б)

Рис. 5. Структуры, формирующиеся из микроразмерных сферических частиц CaF_2 (а) проекция линейного кулоновский кристалла на плоскость XZ при L = 180 мм; (б) проекция зигзага на плоскость XZ при L = 173 мм

При $L = 155$ мм формируется «расширенный» зигзаг, который изображен на рис. 6а. Такая конфигурация является двумерной, однако поперечная длина кулоновского кристалла увеличивается по сравнению с поперечной длиной зигзага, изображенного на рис. 5б.

При дальнейшем уменьшении L формируется трехмерная винтовая структура, как и в случае с ионными кристаллами. Структура, полученная при $L = 140$ мм, представлена на рис. 6б. Здесь фазовый переход зигзаг-трехмерная структура характеризуется резким уменьшением поперечного размера кристалла.



(а) (б)

Рис. 6. Структуры, формирующиеся из микроразмерных сферических частиц CaF_2 (а) «расширенный» зигзаг при $L = 155$ мм: проекция на плоскость XY и трехмерное изображение структуры; (б) трехмерная структура при $L = 140$ мм: проекция на плоскость XY и трехмерное изображение структуры

Таким образом, проведенное моделирование показывает, что структура кулоновского кристалла существенно зависит от геометрии ловушки, то есть от формы пространственного распределения потенциала от запирающих электродов. При $L \gg R$ формируется одномерная линейная структура. При последовательном уменьшении L образуются двумерные и трехмерные структуры.

На основе данных моделирования динамики ионов при различных длинах ловушки и данных, соответствующих моделированию эффективного потенциала, можно заключить, что фазовые переходы в кулоновских кристаллах соответствуют трансформации эффективного потенциала от эллиптического (рис. 1а) к double-well форме (рис. 1г). С последовательным уменьшением длины ловушки L наблюдается переход от одномерной структуры (ожерелье) к двумерной (зигзаг), а затем – к трехмерной (винтовая структура). Структуры из ионов Ca^+, полученные в результате моделирования, согласуются с экспериментальными данными [5]. Кроме того, моделирование показало, что любой длине ловушки при прочих равных параметрах соответствует единственное число ионов, при котором сохраняется линейная структура (рис. 4). Этот результат важен для практического применения кулоновских кристаллов в построении квантовых компьютеров, в которых предпочтительно использование длинных цепочек ионов. Более того, реализация double-well формы эффективного потенциала открывает возможность для локализации двух связанных линейных цепочек, что предположительно двукратно увеличивает возможное количество связанных ионов. Также с помощью моделирования было показано, что упорядоченные структуры также могут формироваться и из микроразмерных частиц. Квазикристаллические структуры из микрочастиц аналогичны ионным кристаллам и

также претерпевают фазовые переходы. При этом кулоновские кристаллы микрочастиц обладают своими особенностями. Например, в случае трансформации зигзаг – винтовая структура наблюдается резкое уменьшение поперечного размера кристалла, в то время как в случае ионного кристалла поперечный размер увеличивается. Механизмы упорядочивания микрочастиц ранее не изучались и требуют дальнейшего исследования.

Литература

1. Fishman S., Chiara G. De, Calarco T., Morigi G. Structural phase transitions in low-dimensional ion crystals // Physical review B. 2008.
2. Douglas D.J., Frank A.J., Dunmin M. Linear Ion Traps in Mass Spectrometry // Mass Spectrometry Reviews. 2003.
3. Rudyi S.S., Vovk T.A., Kosternoy I.A., Romanova A.V. and Rozhdestvensky Y.V. Outside localization around a toroidal electrode of a Paul trap // Journal of Physics Communications. 2020.
4. Балыкин В.И., Летохов В.С., Миногин В.Г. Охлаждение атомов давлением лазерного излучения // Успехи физических наук. 1985. No. 147. pp. 117–156.
5. Pyka K., Keller J., Partner H.L., Nigmatullin R., Burgermeister T., Meier D.M., Kuhlmann K., Retzker A., Plenio M.B., Zurek W.H., Campo A. del, Mehlstaubler T.E. Topological defect formation and spontaneous symmetry breaking in ion Coulomb crystals // Nature Communications. 2013.

Сацюк Ксения Андреевна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
студент группы № Т3417,
направление подготовки: 19.03.02 – Продукты питания из растительного сырья,
e-mail: sacyukksenia@gmail.com
Баракова Надежда Васильевна
Год рождения: 1954
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
к.т.н., доцент,
e-mail: barakova@corp.ifmo.ru

УДК 664.231, 663.53

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКЦИИ КРАХМАЛА «С» ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЭТАНОЛА

К.А. Сацюк
Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.В. Баракова

Работа выполнена в рамках темы НИР №617027 «Ресурсосберегающие экологически безопасные биотехнологии функциональных и специализированных продуктов на основе глубокой переработки продовольственного сырья».

Аннотация.
В работе показана перспективность применения фракции крахмала «С» в технологии биоэтанола. Фракция крахмала «С» была получена из пшеничной муки после отмывания из нее клейковины (глютена) и выделения крахмала фракции «А» и «В». Суспензия с содержанием сухих веществ 3% концентрировалась до содержания сухих веществ 18%. Было подобрано азотистое питание-пептон, который в количестве 1,52 г/100 $см^3$ сусла вносился на стадии реактивации дрожжей и такое же количество – на стадии брожения. В результате был получен выход спирта 30,9 мг/ 100г сырья, что сопоставимо с выходом спирта из зернового сырья.
Ключевые слова
Глубокая переработка пшеницы, биоэтанол, фракция крахмала «С».

Фракция крахмала «С» – это пентозановая фракция, состоящая из крахмальных зерен размером менее девяти микрометров, поврежденных крахмальных зерен более крупных фракций крахмала «А» и «В», пентозанов и остатков β-глюканов. Данная фракция получается при «мокром» способе переработки пшеничного сырья, называемом также технологией глубокой переработки.

Технология глубокой переработки пшеницы относится к сектору сельского хозяйства и биотехнологий, она широко применяется в мире поскольку позволяет при переработке одного и того же сырья существенно повысить ценность получаемых готовых продуктов. Такой эффект происходит засчет разделения основных частей зерна на составляющие компоненты и их отдельную переработку. Каждый из этих компонентов по отдельности имеет высокую стоимость и может быть использован в различных отраслях как пищевой, так и химической промышленности.

Основными продуктами технологии глубокой переработки пшеницы являются

отруби, крахмал фракций «А», «В», «С» и глютен – пшеничный белок. В настоящее время с дополненными технологическими схемами и современными технологиями переработки пшеничного сырья есть возможность получения таких готовых продуктов глубокой переработки, как например: глюкоза, глюкозо-фруктозные сиропы, органические кислоты (молочная, янтарная, лимонная и др.), аминокислоты (лизин, треонин и др.), жирные кислоты, биоэтанол, добавки к кормам для животноводства.

Для производства глюкозы или глюкозо-фруктозных сиропов используют фракцию крахмала «А», а фракции крахмала «В» и «С» в основном перерабатывают вместе для получения малоценных кормовых продуктов, с содержанием сырого протеина не более 10% и большим количеством пентозанов, что ограничивает их включение в рационе питания животных, или их используют для получения биоэтанола [1].

Как готовый продукт биоэтанол имеет широкое применение. Он используется как сырье для промышленного производства химических продуктов: медицинских химикатов, растворителей и кислот. Биоэтанол может использоваться также как добавка к топливу. Содержащийся в этаноле кислород позволяет более полно сжигать углеводороды и повышать качество получаемого топлива. Так 10%-ое содержание биоэтанола в бензине позволяет сократить выброс углекислого газа до 30 %, увеличивать октановое число топлива и использовать его для большинства марок автомобилей, не меняя при этом конструкцию двигателя. Организация производства биоэтанола на предприятии позволит также получать высокоценный кормовой продукт с содержанием белка около 20 % – барду DDGS.

Ранее считалось, что разделить пентозановую фракцию и фракцию крахмала «В» достаточно сложно, но современное технологическое оборудование, основанное на трехфазной сепарации, позволяет более полно отделить фракцию «В» от пентозановой фракции «С». Таким образом появляется возможность использования фракции крахмала «В» так же, как и фракции крахмала «А» – для получения модифицированных крахмалов, глюкозы или глюкозно-фруктозных сиропов. Это решение позволит предприятию мощностью переработки 200 тысяч тонн пшеницы в год увеличить прибыль от продажи глюкозы на 7 миллионов евро по сравнению с технологией получения глюкозы только из фракции крахмала «А».

При разделении фракций крахмала «В» и «С» и отдельном использовании фракции «В», появляется возможность использовать фракцию крахмала «С» как самостоятельную фракцию для получения биоэтанола. Но, в связи с технологическими особенностями выделения глютена и фракций крахмала «А» и «В», в выделенной фракции крахмала «С» большинство азотистых компонентов выведены из состава питательной среды. Поэтому необходимо провести подбор азотистого питания для обогащения фракции «С» на стадии реактивации дрожжей и на стадии сбраживания осахаренного сусла, так как наличие достаточного количества азотистого питания благоприятно влияет на физиологическое состояние и бродильную активность дрожжей, что в свою очередь влияет на процесс сбраживания фракции «С» и полученный в итоге выход спирта [2].

Во всем мире существует тенденция роста доли пшеницы, идущей на глубокую переработку. В России эта доля пока очень низкая, всего 1,5 млн тонн в год из 120 млн. тонн урожая. Но уже виден рост доли пшеницы, идущей на глубокую переработку – во многих регионах России ведется проектирование, а в некоторых случаях строительство или уже осуществлен запуск предприятий, осуществляющих технологию глубокой переработки пшеницы. Фактически объем глубокой переработки пшеницы в России в ближайшие годы будет увеличен в 2,5 раза. Целесообразно на стадии проектирования новых предприятий предусмотреть технологию раздельной переработки фракций крахмала «В» и «С», с получением из последней фракции биоэтанола.

Целью данной исследовательской работы являлось исследование, связанное с подготовкой фракции крахмала «С» для получения биоэтанола.

Основным объектом исследования являлась фракция крахмала «С», полученная в лабораторных условиях при отмывании клейковины из муки в условиях, близких к условиям технологии глубокой переработки пшеницы [3].

Фракцию крахмала «С» получали после отмывания клейковины из муки и отстаивания крахмальной суспензии при температуре +4°С в течение 24 часов. При таких условиях крупные крахмальные зерна (крахмал фракции «А» и «В») оседали на дно мерного стакана. Размер зерен крахмала определяли под микроскопом ZEISS AxioLab.A1 в камере Горяева. Согласно технологии разделения крахмальной суспензии после выделения клейковины, концентрация сухих веществ во фракции крахмала «С» должна составлять около 5% [4]. Полученное содержание сухих веществ в полученной фракции «С» составило 3 %.

Для проведения исследовании по влиянию различных видов азотистого питания на рост дрожжевых клеток были подготовлены образцы фракции крахмала «С» с введением в сусло разных видов азотистого питания с различной концентрацией: мочевина $(NH_2)_2CO$, пептон, сернистокислый аммоний $(NH_4)_2SO_4$ и фосфорнокислый аммоний $NH_4H_2PO_4$.

Влияние различного вила азотистого питания на физиологическое состояние дрожжевых клеток оценивали на стадии реактивации дрожжей и на стадии сбраживания сусла. Реактивация дрожжей проводилась в течение 1 часа при температуре 30°С. В качестве образца сравнения использовался контрольный образец № 1 – без добавления азотистого питания. Физиологическое состояние дрожжей оценивали по приросту биомассы во время реактивации дрожжей и по бродильной активности дрожжей в процессе сбраживания сусла, полученного из фракции крахмала «С». Количество клеток дрожжей определялось с помощью подсчета в камере Горяева.

Для оценки влияния вида азотистого питания на процесс сбраживания сусла были отобраны 4 образца, в которых на этапе реактивации дрожжей был отмечен наибольший прирост биомассы дрожжей, то образцы № 4, № 5, № 10 и № 13, а также контрольный образец № 1. Показатели проведенных исследований представлены в таб. 1.

Из таб. 1 следует, что наибольший прирост биомассы дрожжей был отмечен в образце №5, в сусло которого до реактивации дрожжей было внесено 1,54 г/100 $см^3$ пептона, и в этом же образце в процессе брожения было выделено наибольшее количество диоксида углерода – 1,63 г/100$см^3$ сусла, в бражке была получена наибольшая крепость спирта – 5,1% об, и был получен наибольший выход спирта – 17,7 г/100 г сухих веществ сырья.

На следующем этапе проведения эксперимента использовалась концентрированная фракция крахмала «С», которая была получена путем концентрирования на центрифуге Rotanta 460 со скоростью вращения ротора 1600 об/мин в течение 6 минут до содержания сухих веществ 5%. Затем из фракции крахмала «С» выпаривали воду на роторно-выпарной установке LabTech EV31 при температуре 75ºС и со скоростью вращения 120 об/мин до содержания сухих веществ 18%. Пептон в количестве 1,54 г/100$см^3$ сусла вносился до стадии реактивации дрожжей и 1,54 г/100$см^3$ до стадии сбраживания сусла. Брожение проводилось в течение 72 часов при температуре 30°С.

В контрольный образец при проведении реактивации сухих спиртовых дрожжей и сбраживания осахаренного сусла фракции крахмала «С» азотистое питание не вносилось. Режимы проведения реактивации дрожжей и сбраживания осахаренного сусла соответствовали режимам реактивации и сбраживания исследуемого образца.

Таблица 1

Зависимость физиологического состояния дрожжей от вида азотистого питания

№ образцов	Азотистое питание		Результаты реактивации	Результаты брожения		
	Наименование азотистого питания	Доза внесения, г/100 см^3	Кол-во дрожжевых клеток, млн/мл	Кол-во выделившегося CO_2, г/100 г сусла	Крепость спирта, % об	Выход спирта, мл/100 г сухих веществ
1	Контроль	–	1,05	0,39±0,02	1,8±0,09	6,3±0,32
2	Мочевина	0,14	3,37	–	–	–
3	Мочевина	0,21	3,70	–	–	–
4	Мочевина	0,29	5,32	0,79±0,04	2,5±0,13	7,3±0,04
5	Пептон	1,54	6,20	1,63±0,08	5,1±0,25	17,7±0,88
6	Пептон	2,05	3,20	–	–	–
7	Пептон	2,57	5,30	–	–	–
8	Аммоний сернокислый	1,14	3,00	–	–	–
9	Аммоний сернокислый	2,88	3,20	–	–	–
10	Аммоний сернокислый	5,71	3,60	1,32±0,07	4,2±0,21	15,4±0,77
11	Аммоний фосфорнокислый	1,14	2,62	–	–	–
12	Аммоний фосфорнокислый	5,71	6,82	–	–	–
13	Аммоний фосфорнокислый	8,57	7,80	1,31±0,07	3,2±0,16	11,4±0,57

Эффективность применения пептона в качестве дополнительного азотистого питания для получения спирта из осахаренного сусла фракции крахмала «С» оценивалась по показателям зрелой бражки. Данные проведенного эксперимента представлены в таб. 2.

Таблица 2

Показатели бражки в зависимости от добавления пептона в качестве азотистого питания

№	Наименование образца	Доза внесения, г/100см^3		Показатели бражки	
		Режим реактивации	Режим брожения	Крепость спирта, % об	Выход спирта, мл/100 г сухих веществ
1	Контроль	–	–	2,5±0,13	8,5±0,424
2	Пептон	1,54	1,54	7,8±0,38	30,91±1,291

Из таб. 2 следует, что при дозе внесения пептона равной 1,54 г/100см^3 на стадии реактивации дрожжей и внесение пептона в том же количестве на стадии брожения – выход спирта составил 30,91 мл/100 г сухих веществ, что в 3 раза превышает показатель в контрольном образце, без добавления азотистого питания, что говорит об эффективности применения пептона в качестве азотистого питания для получения биоэтанола из фракции крахмала «С». Выход спирта в количестве 30,9 мг/ 100г сырья, сопоставим с выходом спирта из зернового сырья [5].

Полученные результаты говорят о перспективности применения фракции крахмала «С» в технологии получения биоэтанола, Более того, хорошее физиологическое состояние дрожжей при сбраживании сусла, полученного из фракции крахмала «С» позволяют в будущем рассматривать эту фракцию как питательную среду для микроорганизмов и применять ее для различных биотехнологических процессов, в том числе для биосинтеза различных аминокислот.

Литература

1. Гернет М.В., Кобелев К.В., Грибкова И.Н. Количественное определение пентозанов как метод оценки качества ржи // Пиво и напитки. 2013. №2.
2. Сумина Л.И., Крикунова Л.Н. Влияние углеводного состава сусла на развитие спиртовых дрожжей // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2013. №1. С. 10–20.
3. Куликов Д.С., Гольдштейн В.Г., Страхова С.А. Технология производства клейковины и крахмала с учетом влияния технологических параметров // Вестник КрасГАУ. 2018. № 3. С. 172-175.
4. Shevkani. K. Wheat starch production, structure, functionality and applications / K. Shevkani, N. Singh, A. Kaur // International Journal of Food Science & Technology. 2017. V. 52. P. 38 – 58.
5. Типовой технологический регламент производства спирта из крахмалистого сырья. М. 1998. 78 с

Трифонова Альбина Олеговна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий
студент группы № К3410
направление подготовки: 10.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
e-mail: trifonova_albina@mail.ru
Распаев Юрий Алексеевич
Год рождения: 1966
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: raspaev@mail.ru

УДК 004.735

РАЗРАБОТКА СЕГМЕНТА ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕЛЕМАТИКИ ПО ДОРОГЕ А-181 НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ LPWAN

А.О. Трифонова
Научный руководитель – к.т.н. Ю.А. Распаев

Аннотация
В работе предложены технические решения по построению пилотной зоны сегмента федеральной сети транспортной телематики на дороге А-181 «Скандинавия» на базе технологии LPWAN, рассмотрены возможности технологии XNB, сервисы, реализуемые для целей транспортного комплекса, а также обоснованы режимы работы мобильных абонентских станций в сети.
Ключевые слова
LPWAN, XNB, федеральная сеть транспортной телематики, сеть радиодоступа, интернет вещей.

Концепция развития транспортного комплекса в Российской Федерации, утверждённая Минтрансом, включает в себя строительство федеральной сети транспортной телематики (ФСТТ) в целях повышения эффективности транспортного комплекса, безопасности и качества грузовых и пассажирских перевозок [1]. В качестве базовой технологии построения ФСТТ концепция определяет технологию LPWAN (Low-power Wide-area Network –энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия). Эта технология применяется для передачи небольшого объёма информации в сетях интернета вещей городского уровня . К классу LPWAN относится множество протоколов (стандартов), среди которых можно выделить перспективный протокол отечественной разработки XNB. Особенности транспортного комплекса, а именно подвижность терминальных устройств, низкая плотность абонентов и протяженная зона обслуживания, а также ограничения со стороны законодательства в сфере интернета вещей обуславливают необходимость разработки решений по применению технологии LPWAN для целей транспортного комплекса. По заказу Минтранса в целях подтверждения возможностей технологий связи на трассе А-181 начинается строительство пилотной зоны ФСТТ. В работе получены решения по построению ФСТТ на трассе А-181 с использованием технологии XNB. Разработанные решения

позволяют использовать энергоэффективные технологии связи для реализации сервисов по сбору данных о местоположении перевозимых грузов и транспортных средств (ТС) и резервного канала для передачи сообщений экстренного реагирования в случаях чрезвычайных ситуаций (ЧС) на дороге.

Цель исследования – разработка решений по построению сегмента сети транспортной телематики на трассе А-181 «Скандинавия» на базе технологии LPWAN с учётом особенностей информационных сервисов, ориентированных на транспортные средства.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи: классификация информационных сервисов и обоснование требований к сети связи, анализ технических возможностей перспективной технологии XNB, обоснование режимов работы абонентских станций (АС), расчёт технических параметры сети, зон обслуживания базовых станций (БС) с учётом возможностей технологии и требований сервисов. Результатом проделанной работы являются технические решения для построения сегмента сети транспортной телематики на трассе А-181.

В ФСТТ выделяются два вида сервисов [1]:

– критически важные сервисы (отслеживание перемещения специальных грузов, оповещение о чрезвычайных ситуациях путем передачи данных о происшествиях, информирование о состоянии перевозимых грузов);

– дополнительные (мониторинг состояния инфраструктуры, сбор и обработка данных с датчиков на транспорте, управление датчиками, отправка команд клиентскому оборудованию).

Реализация тех или иных сервисов выдвигает требования к сетям связи, к которым в первую очередь относятся:

– скорости передачи данных;

– объемы передаваемых сообщений;

– наличие обратного канала.

Реализация сервисов сбора данных о местоположении и отправки сообщений экстренного реагирования также имеют требования по актуальности данных и периодичности передачи данных.

Вероятностно-временные характеристики передачи телеметрической информации определяются возможностями технологий, техническими характеристиками оборудования, а также ограничениями использования радиочастот со стороны Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ). Так решение ГКРЧ от 7 мая 2007 года №07-20-03-001 ограничивает мощности передатчиков и периодичность передачи АС до 0,1% от общего цикла работы [2].

В таб. 1 приведены основные требования сервисов на сети транспортной телематики. Данные получены путем анализа протокола NMEA, системы экстренного реагирования ЭРА-ГЛОНАСС и используемых технологий на сети транспортной телематики. Из таблицы видно, что для реализации критических сервисов требуется скорость передачи не менее 3 кбит/с с периодом 3 минуты. Для энергоэффективных технологий связи такие требования в полном объёме не достижимы, так как XNB поддерживает скорости на линии вверх не более 1 кбит/с.

Основными техническими параметрами, которые требуют обоснования для построения сети являются ширина полосы пропускания, скорость передачи данных, радиус зоны обслуживания и классы поддерживаемого оборудования. Основные характеристики технологии XNB представлены в таб. 2.

Таблица 1

Требования телематических сервисов

Сервис	Длина кадра, байт	Временной показатель	Скорость передачи
Передача координат	82	Необходимая частота передачи - 3 мин.	3,6 кбит/с (период работы 0,1 %)
Сообщения экстренного реагирования	140	Максимальное время доставки – 10 с.	112 бит/с
Сбор телематических данных со стационарных датчиков	от 500 бит до нескольких мегабит	Неограниченное время доставки	от 100 бит/с (для сверхузкополосных систем) до 200 кбит/с (для существующих систем IoT)
Сбор телематики с транспортных средств	От нескольких килобит до сотен мегабайт	Время доставки ограничивается необходимой степенью актуальности	от 10 Мбит/с (для сотовых сетей GSM/LTE)

Таблица 2

Характеристики технологии XNB

Характеристики	**Значения**
Частота передачи	863-865/874-876 МГц
Ширина полосы пропускания	100 Гц, 1 кГц, 10 кГц
Используемая модуляция	DBPSK
Скорость передачи данных	100 бит/с, 1 кбит/с, 10 кбит/с
Длина пакетов	20 байт, 84 байта
Мощность передачи	0,2/5 Вт
Радиус зоны обслуживания	7 – 24 км
Классы поддерживаемого оборудования	1, 2, 3

Технология XNB поддерживает три класса абонентского оборудования. К первому классу оборудования относятся станции, работающие только в режиме циклической передачи данных на БС. У таких станций ограниченный заряд аккумулятора, поэтому они находятся в активном режиме только во время передачи. Станции второго класса работают в режиме кратковременной передачи и последующего кратковременного приема от БС. Оборудование третьего класса - станции, постоянно работающие в режиме приема и кратковременно передающие данные на линии «вверх». Работа оборудования третьего класса, расположенного на транспортных средствах, требует определения местоположения, однако протоколом XNB не предусмотрены соответствующие методы маршрутизации, поэтому работа устройств этого класса в сетях транспортной телематики ограничена.

На основе характеристик технологии XNB и ограничений со стороны ГКРЧ были рассчитаны показатели качества сервисов ФСТТ на базе технологии LPWAN (таб. 3).

Таблица 3

Оценка времени и периода передачи при реализации сервисов на XNB

Сервис	Структура протокола	Количество требуемых пакетов XNB	Время передачи, с	Период передачи, с	Время передачи, с	Период передачи, с
			скорость 1 кбит/с		скорость 100 бит/с	
Передача координат (длина полезных данных 80 байт)	Q3 (длина пакета 20 байт, Payload 8 байт)	10 (200 байт)	1,6	1600 (26,7 мин)	16	16 000 (266 мин)
	Q4 (длина пакета 84 байта, Payload 64 байт)	2 (168 байт)	1,3	1300 (17,1 мин)	13,44	13440 (224 мин)
Передача телеметрии в экстренных случаях (длина полезных данных 140 байт)	Q3	18 (360 байт)	2,9	2900 (48,3 мин)	28,8	28800 (480 мин)
	Q4	3 (252 байта)	2,0	2000 (33,3 мин)	20,16	20160 (336 мин)

В качестве цикла работы АС в расчетах принимался цикл работы оборудования в зоне обслуживания всей сети. Из анализа видно, что при отсчете цикла передачи в зоне обслуживания всей сети, допустимые периоды передачи варьируются от 17 до 48 минут, что не соответствует требуемым характеристикам детализации сервисов, так как транспортное средство, двигаясь со скоростью 90 км/ч, преодолевает за это время расстояние от 25 км. Для увеличения детализации предлагается принимать в качестве цикла работы АС ее время нахождения в зоне обслуживания одной БС. При переходе в другую зону цикл начинается сначала. Таким образом периодичность передачи сообщений для мобильных АС будут зависеть не столько от времени передачи пакета, сколько от количества БС и их зон обслуживания.

Зоны обслуживания БС зависят от энергетических параметров сигнала и высоты подвеса антенны. Энергетические параметры определены оборудованием БС, которое на рынке представлено производителем ООО «СРТ». Установка антенн возможна на антенно-мачтовых сооружениях (АМС) и на существующих вдоль дороги опорах. Дальность зон обслуживания рассчитана по модели Ли для высот опор 7 и 10 метров и для АМС высотой 30 метров. Результаты расчетов дальности зон обслуживания, а также периоды передачи данных, которые возможно реализовать в данных условиях приведены в таб. 4.

Таблица 4

Типовые зоны покрытия технологии XNB

Линия	Бюджет линии, дБ	Скорость передачи данных, бит/с	Высота подвеса антенны, м	Расстояние, км
UL	146	1000	7	6,982
			10	8,403
			30	14,869
UL	154	100	7	11,265
			10	13,558
			30	23,992

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы. Исходя из требований сервисов скорость передачи данных на линии вверх должна быть не менее 1 кбит/с, поэтому ширина полосы пропускания сети XNB должна быть не менее 1 кГц. Детализация и актуальность мониторинга перемещения АС определяют качество сервиса. Наилучшая детализация данных реализуется при длине пакета 84 байта, детализация зависит от радиуса зон обслуживания (детализация передачи данных о местоположении от 7 до 15 км). Из-за отсутствия протоколов маршрутизации в XNB в сети не поддерживается работа абонентских станций 3 класса.

Исходя из требований сервисов, технических характеристик технологии XNB были разработаны технические решения по построению сегмента сети транспортной телематики на трассе А-181.

С учётом протяжённого характера зоны обслуживания автомобильной дороги рассчитаны характеристики передатчика и коэффициент усиления антенны.

Для реализации мониторинга перемещения и состояния грузов, а также обеспечения резервного канала для передачи сообщений экстренного реагирования была выбрана ширина полосы пропускания 1 кГц со скоростью 1 кбит/с. Существующие опоры вдоль дороги позволяют установить БС на высоте 7 метров без строительства антенно-мачтовых сооружений, что удешевляет сеть, так как строительство АМС стоит практически в 10 раз больше стоимости оборудования.

Принято решение устанавливать БС с двумя передатчиками и двумя направленными антеннами, что увеличивает пропускную способность сети и улучшает качество сервисов.

На основании принятых технических решений разработана цифровая модель сети транспортной телематики с использованием специализированного программного комплекса ICS Telecom. Для расчетов была выбрана модель МСЭ 1546 [3], которая рекомендована международным союзом электросвязи, для расчета напряженности поля фиксированных радиослужб на частотах 30 до 3000 МГц. Модель учитывает климатические условия распространения на основании эмпирических кривых и их интерполяции и экстраполяции, индекс рефракции на поверхности. Выбор модели происходил по частотному диапазону и особенностям местности зоны обслуживания. Первоначально станции устанавливаются с учетом теоретических расчетов по модели Ли, а именно на расстоянии 14 км между станциями. Параметры станций и модели были установлены с учетом вероятности связи по месту и времени 95%. После первоначальной установки выполнена оптимизация сети, которая обеспечивает непрерывное покрытие на дороге. После оптимизации расстояние между станциями составило 7-10 км в зависимости от рельефа местности и наличия опор. Результаты моделирования после оптимизации представлены на рис. 1.

Структурная схема сети представлена на рис. 2. АС в сети – датчики на перевозимых грузах и автомобилях, стационарные датчики на объектах инфраструктуры. Они отправляют свои данные с заданным периодом передачи на точки доступа. БС производят сбор данных со всех АС и передают их на Центр сбора обработки и хранения данных (центр баз данных - БД) посредством сетей LTE/GSM или через выделенную линию оптоволоконного кабеля (при наличии). В случае отсутствия связи с транспортной сетью БС хранит данные до возможности отправки их на сервер.

Ядро сети состоит из центра управления доступом и центра управления сетью.

Центр управления доступом осуществляет контроль доступа абонентских станций и базовых станций путем сверки криптографических подписей и осуществляет управление сервисами и клиентами. Ключи для формирования подписей загружены на оконечное оборудование заранее.

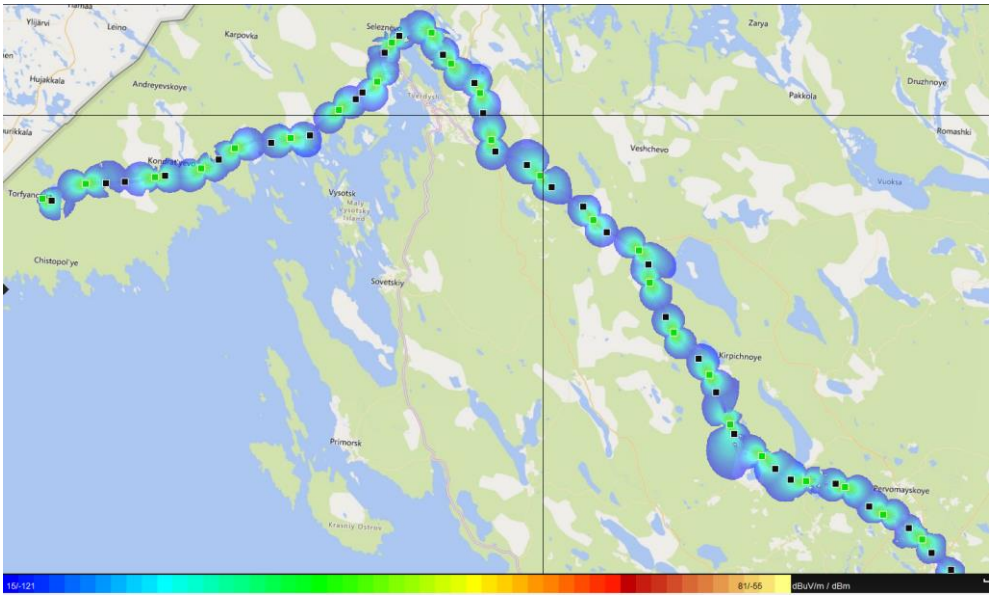


Рис. 1. Зона обслуживания сети LPWAN на трассе А-181

Задачей Центра управления сетью является управление базовыми станциями (обновление ПО, организация каналов и т. д.) и абонентскими станциями (запросы, управление мощностями, периодом передачи и т. д.).

Сервер баз данных осуществляет аутентификацию передаваемых данных, их фрагментацию/дефрагментацию и отсеивание дубликатов. Кроме того, на этом уровне осуществляется привязка АС к БС (для оконечного оборудования 2 и 3 класса). С помощью сервера БД пользователи оконечных услуг имеют возможность получать необходимые данные и отправлять запросы в сеть.

Рассчитаны технико-экономические показатели объекта: протяжённость объекта 161 км, в состав сети входит 28 базовых станций, общая пропускная способность сети – 5,94 Мбит/с. Общая стоимость сети составляет 7 320 000 рублей с учетом проектных работ.

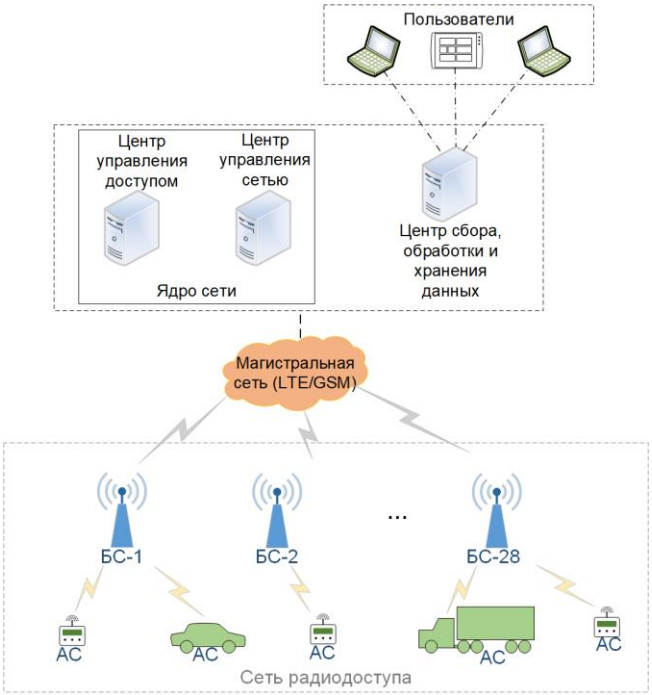


Рис. 2. Структурная схема сети

Разработанные технические решения позволяют эффективно применять технологию LPWAN для построения федеральной сети транспортной телематики на дороге А-181. Особенности технологии LPWAN позволяют использовать сеть для мобильных абонентов и реализации сервисов сбора информации о местоположении, оповещения при ЧС на дорогах.

По планам развития ФСТТ строительство сетей LPWAN на А-181 начнется в 2020 году. Пилотная зона позволит подтвердить правильность принятых технических решений, а также определит направления по совершенствованию протокола XNB.

Литература

1. Концепция развития сетей узкополосной связи по технологии LPWAN для сбора телеметрической информации на транспортной инфраструктуре, с учетом решений, разработанных в концепции построения и развития узкополосных беспроводных сетей связи "Интернета вещей" на территории Российской Федерации. М. 2019. 32 с.
2. Решение ГКРЧ от 7 мая 2007 года №07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия». М. Стандартинформ. 2007. 33 с.
3. Рекомендация МСЭ-R P.1546-5. Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. Женева: Электронная публикация. 2014. 58 с.

УЧАСТНИКИ КОНКУРСА
НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»

Алибутаев Александр Казибутаевич
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы № N3450,
направление подготовки: 10.03.01 – Организация и технология
защиты информации,
e-mail: alibutaev.alex@gmail.com
Левко Игорь Владимирович
Год рождения: 1963
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
к.т.н. доцент (квалификационная категория ординарный доцент),
e-mail: levko_iv@mail.ru

УДК 004.021

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВУХФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ С ПОМОЩЬЮ БИОМЕТРИЧЕСКОГО СКАНЕРА МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

А.К. Алибутаев
Научный руководитель – к.т.н., доцент И.В. Левко

Аннотация
В настоящее время СКУД является одним из главных способов создания контролируемой зоны на территории организации. Возможность объединения с ней системы охранной и пожарной сигнализации делает СКУД ключевым звеном в цепочке обеспечения физической защиты. Поэтому вероятность получения несанкционированного доступа к управлению СКУД должна быть минимизирована. В работе проведено исследование доступных способов аутентификации в ПО СКУД и разработан алгоритм, предоставляющий допустимый уровень доверия к результатам аутентификации оператора.
Ключевые слова
Информационная безопасность, СКУД, уровень доверия к аутентификации, многофакторная аутентификация.

Большинство представленных на российском рынке ПО СКУД имеют низкий уровень доверия к результатам аутентификации, как показано в табл. 1: используется один фактор аутентификации, поддерживается функция автоматического входа, которая исключает ввод идентификатора и пароля, и автоматическое заполнение сохраненной аутентификационной информации, что снижает уровень доверия до УД-1. Это может быть следствием повышения удобства пользования и снижением времени, затрачиваемого на прохождения аутентификации. УД-1 дает минимальную гарантию того, что субъект аутентификации является именно тем, кем он представляется, и не предоставляет защиты от НСД со стороны внутреннего нарушителя при отсутствии дополнительных организационных мер. Необходимость защиты от подобных атак, а также влияние подключенных модулей ПО СКУД на личную безопасность сотрудников организации требует введения УД-3 к результатам аутентификации оператора. Для повышения УД предлагается разработать алгоритм, регламентирующий

процедуру аутентификации и сопутствующие ей организационные меры. Он призван повысить степень уверенности в подлинности субъекта аутентификации за счет введения дополнительных факторов аутентификации и поддерживающих ее механизмов, что увеличит время, затрачиваемое на ее прохождение (таб. 1).

Таблица 1

Сравнение механизма аутентификации оператора в ПО СКУД

Критерии	Программное обеспечение		
	«Базовый модуль» Sigur 1.0.60.1	«Орион Про» 1.20.2	ParsecNet 3 3.9
Фактор аутентификации	1 – знание	1 – знание	1 – знание или владение
Аутентификационная информация	Многоразовый пароль	Многоразовый пароль	Многоразовый пароль / бесконтактная карта
Автоматический вход	+	+	+
Максимальный УД	УД-2	УД-2	УД-2

Исходя из определенного уровня доверия, конкретизируем требования к алгоритму аутентификации на основании стандарта ISO/IEC 29115:2013[1]:

1) использование двух или более факторов аутентификации;
2) администратор системы должен производить первичную идентификацию оператора при регистрации;
3) обеспечение криптографической защиты аутентификационной информации при транзите и в состоянии покоя;
4) наличие средств контроля, позволяющих уменьшить эффективность атак перехвата информации и подбора в режиме реального времени.

Как видно из поставленных требований, высокий уровень доверия к результатам аутентификации невозможно достичь без использования надежных поддерживающих механизмов, в том числе и первичной идентификации. Проверка подлинности идентичности при регистрации необходимо в организациях, имеющих несколько корпусов, т.е. при наличии территориально-распределенной корпоративной сети передачи данных в пределах одного города. Таким образом администратор ПО СКУД сможет лично идентифицировать субъект аутентификации, при необходимости проверив удостоверение личности сотрудника.

Для выполнения требование обеспечения криптографической защиты информации при транзите все запросы между клиентом и сервером, должны передаваться по защищенному каналу связи. Здесь и далее при упоминании запросов от клиента к серверу подразумевается, что данные будут передаваться по сети с использованием протокола HTTPS, обеспечивающим шифрование. В состоянии покоя аутентифкационная информация не должна храниться в открытом виде. Так, пароли рекомендуется хранить в виде результата хеш-функции с солью.

Введение второго фактора, как правило, требует дополнительных финансовых затрат или выделенных вычислительных мощностей. Так же при внедрении двухфакторной аутентификации следует учитывать удобство для конечного пользователя. Чрезмерная сложность может привести к попыткам обхода одного из факторов, либо его полное отключение, если такое предусмотрено механизмом. Поэтому при разработке алгоритма учтем также стоимость разработки и сложность

пользовательского взаимодействия. В таб. 2 приведены основные средства аутентификации [2-3].

Таблица 2

Перечень средств аутентификации

Средство	Информация	Тип фактора	Стоимость внедрения	Потенциальные сложности
Пароль или PIN-код	Многоразовый пароль	Знание	Низкая	Запоминание длинных паролей
Смарт-карта	Многоразовый пароль	Владение	Средняя	Возможность кражи, потери
SMS	Одноразовый пароль	Владение	Низкая + оплата SMS	Необходимость наличия сигнала сотовой связи
Биометрический сканер	Биометрия	Биометрическая характеристика	Средняя	Ошибка второго рода, время прохождения аутентификации
Генератор одноразовых паролей	Одноразовый пароль	Владение	Низкая	Возможность кражи, потери

Комбинация пароля и генератора одноразовых паролей (фактор знания и владения) является наиболее бюджетным решением. Однако, данный подход по-прежнему не является достаточным. Хоть он формально и соответствует УД-3, нет никакой уверенности в том, что злоумышленник не сможет получить доступ к системе, пройдя процедуру аутентификации. Так как по-прежнему существует возможность кражи устройства, генерирующего одноразовый пароль, поэтому необходимо обеспечить защиту средств аутентификации.

Защитить устройство от кражи или потери не предоставляется возможным в силу человеческого фактора. Однако возможно защититься от компрометации информации, хранимой в данном устройстве, использовав парольную или биометрическую информацию для доступа к нему. Таким образом, получив физический доступ к устройству, злоумышленнику потребуется определенное время для обхода установленной защиты, за которое факт пропажи станет очевиден. Впоследствии могут быть предприняты меры по отключению устройства, что защитит систему от НСД.

В качестве защищенного устройства генерации одноразовых паролей могут выступать смарт-карты со встроенным сканером отпечатка пальца или приложение, установленное на смартфон сотрудника со сканером биометрии под управлением ОС Android или IOS, что является более бюджетным вариантом и не требует дополнительных затрат на покупку оборудования. Данные ОС обеспечивают защищенное хранение зарегистрированных отпечатков пальцев и объёмно-пространственной формы лица. Использование данной технологии позволит получить преимущество биометрической информации при аутентификации, избавив от необходимости ее хранения и обработки в информационных системах компании.

Как было написано ранее, высокого уровня доверия к результатам аутентификации нельзя достичь, не регламентируя при этом процесс первичной

идентификации или регистрации пользователя. Поэтому сам алгоритм будет целесообразно поделить на две части: первичную идентификацию и аутентификацию.

В процессе первичной идентификации можно выделить два этапа:

1) регистрация оператора или администратора в системе;
2) регистрация персонального устройства генерации одноразовых паролей (смартфона);

На рис. 1 показан процесс первичной идентификации. В рамках него администратор должен проверить документы, удостоверяющие личность сотрудника, после чего зарегистрировать оператора в системе. Далее сотрудник меняет установленный администратором временный пароль, устанавливает приложение на мобильное устройство, которое получает симметричный ключ и сохраняет его в защищенном хранилище.

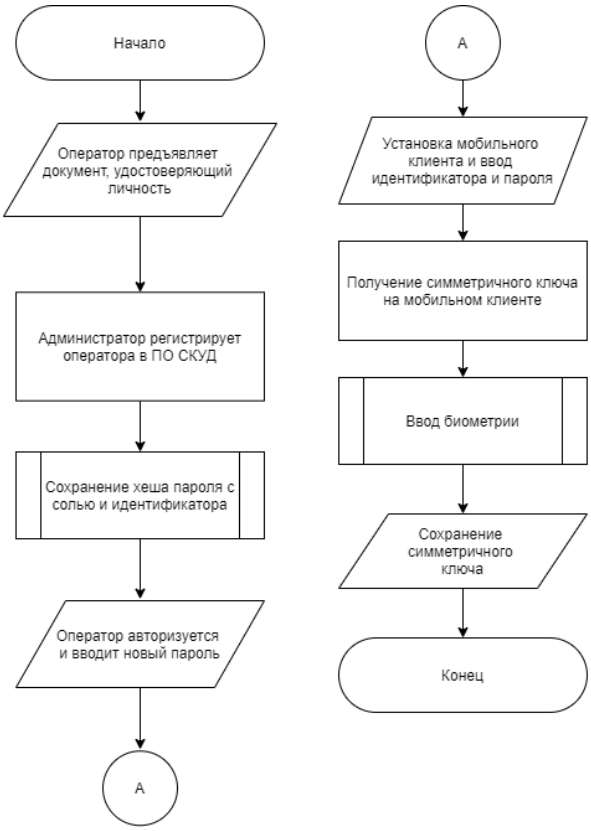


Рис. 1. Блок-схема первичной идентификации

Алгоритм аутентификации состоит из 5 основных шагов:

1) ввод оператором многоразового пароля и идентификатора;
2) проверка введенных данных на сервере;
3) запрос одноразового пароля;
4) генерация одноразового пароля и передача на сервер;
5) проверка введенных данных на сервере.

На шаге ввода многоразового пароля и идентификатора пользователь системы взаимодействует с интерфейсом ПО СКУД. К интерфейсу предъявляется требование скрытия введенных символов пароля.

На стороне сервера происходит проверка хеша пароля с солью с сохраненным в БД и последующая отправка уведомления на привязанное мобильное устройство сотрудника. Во избежание перебора многоразового пароля устанавливается ограничение на три запроса в течение часа от одного пользователя. Данная мера

позволит уменьшить эффективность атаки методом подбора в режиме реального времени, что соответствует поставленным требованиям. Возможно так же установить оповещение администратора при превышении количества запросов на аутентификацию.

Для завершения аутентификации пользователю системы необходимо запустить установленное ранее приложение и сгенерировать одноразовый пароль. Для этого необходимо получить симметричный ключ из хранилища keystore, подтвердив операцию вводом зарегистрированного в устройстве отпечатка пальца. Далее, с использованием ключа будет вычислен код аутентификации сообщения на основе хеш-функции (HMAC), который будет отправлен на сервер.

На сервере при помощи сохраненного ключа генерируется аналогичный HMAC. Если он совпадает с полученным, то пользователь успешно завершил процесс аутентификации, показанный на рис. 2.

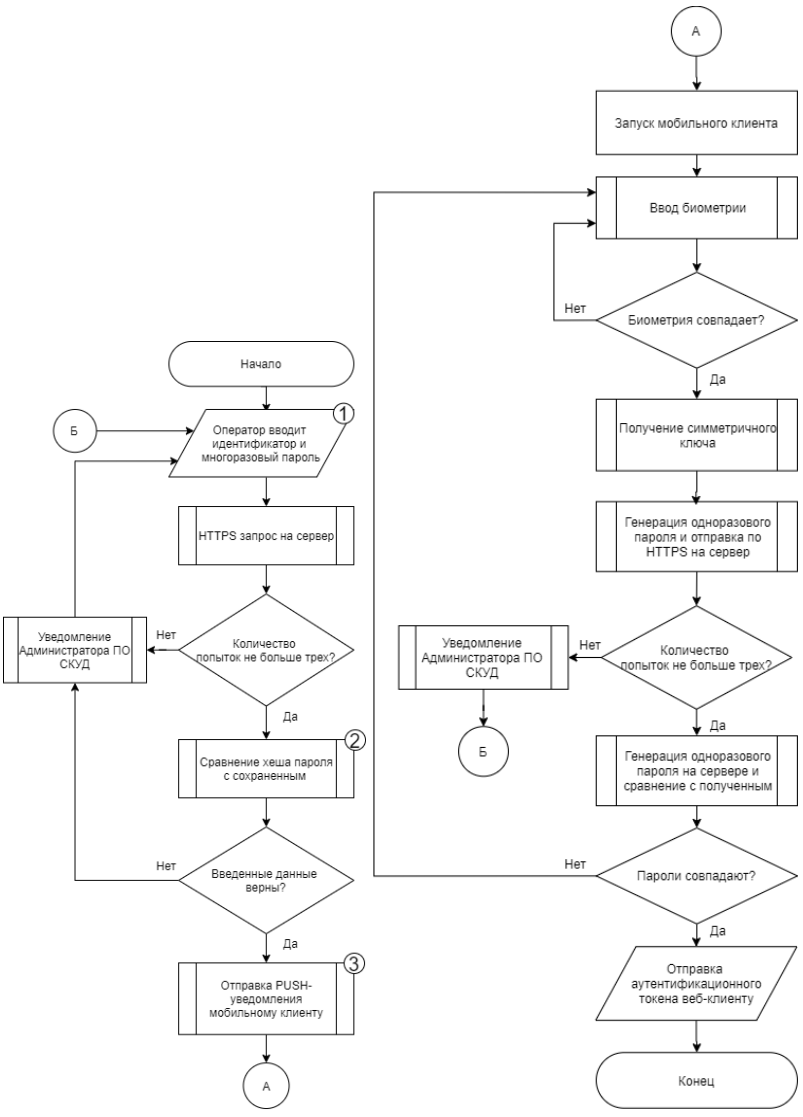


Рис. 2. Блок-схема аутентификации

Согласно алгоритму, для оценки полученного уровня доверия был разработан его рабочий прототип для СКУД, включающий в себя: сервер, веб-клиент и мобильное приложение для операционной системы Android.

Таблица 3

Перечень средств аутентификации

Критерии	Программное обеспечение			
	Sigur 1.0.60.1	«Орион Про» 1.20.2	ParsecNet 3 3.9	Программная реализация алгоритма
Фактор аутентификации	1 (знание)	1 (знание)	1 (знание или владение)	2 (знание и владение)
Средства контроля	-	-	-	+
Проверка подлинности идентичности	+	+	+	+
Уровень доверия	УД-2 (УД-1)	УД-2 (УД-1)	УД-2 (УД-1)	УД-3

В ходе выпускной квалификационной работы:

1. Определены требования к механизму аутентификации в ПО СКУД.
2. Разработан алгоритм, повышающий уровень доверия к результатам аутентификации в ПО СКУД.
3. Разработана программная реализация механизма аутентификации оператора в ПО СКУД, согласно алгоритму.
4. Проведена оценка УД к результатам аутентификации при использовании разработанного алгоритма.

Результатом данной работы является готовый алгоритм аутентификации оператора и администратора в ПО СКУД с высоким уровнем доверия к его результатам.

В дальнейшем планируется разработать смарт-карты со сканером отпечатка и доступом к одноразовому паролю по нему.

Практическая значимость представленного алгоритма заключается в возможности его внедрения в ПО СКУД, используемых на территории объектов критической информационной инфраструктуры, что позволит снизить вероятность возникновения инцидентов с участием внутреннего нарушителя.

Литература

1. ISO/IEC 29115:2013 Information technology – Security techniques – Entity authentication assurance framework [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://standartgost.ru/g/ISO/IEC_29115:2013.
2. Афанасьев А.А., Веденьев Л.Т., Воронцов А.А. Аутентификация. Теория и практика обеспечения безопасного доступа к информационным ресурсам. 2 изд. Горячая линия-Телеком. 2012. 553 с.
3. Сабанов А.Г. Уровни доверия к аутентификаторам // Вопросы информационной безопасности. 2019. №2. С. 10-17.

Альмаметова Алёна Бахтиёровна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий
студент группы № N3450,
направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность,
e-mail: almmtv.a@gmail.com
Левко Игорь Владимирович
Год рождения: 1963
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: levko_iv@mail.ru

УДК 004.492.2

ВЛИЯНИЯ АНТИВИРУСНЫХ ПРОГРАММ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ASTRA LINUX

А.Б. Альмаметова
Научный руководитель – к.т.н., доцент И.В. Левко

Аннотация
В работе рассмотрено влияние антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux с целью повышения качества методики оценивания влияния антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux, что обосновано ростом числа пользователей операционной системы Astra Linux и отсутствием методики оценивания влияния антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux.
Ключевые слова
Методика, производительность, антивирусная программа, Astra Linux, тестирование.

Параметры средств антивирусной защиты, которые влияют на способность обнаруживать и нейтрализовывать вредоносный код, затрачивают ресурсы системы, а значит и влияют на её производительность. Под производительностью компьютера в данной работе понимается способность к точному, быстрому и эффективному выполнению инструкций, заданных пользователем. Исходя из этого определения, методика оценивания влияния антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux будет основываться на сравнении быстродействия определенных базовых задач при использовании различных антивирусных продуктов. Такой метод определения влияния антивирусных продуктов на производительность широко используется различными независимыми лабораториями [1]. Так, например компания AV-Test с 2004 года занимающаяся оценкой антивирусных программ выполняет подобные исследования практически каждый год, однако исходными данными для выполнения их тестирования практически всегда выступают различные версии операционной системы Windows.

После исследования области средств антивирусной защиты были выделены следующие этапы, которые необходимо последовательно выполнять, чтобы корректно оценить влияние антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux, а также выбрать антивирусный продукт, который будет

максимально удовлетворять пользователя как по влиянию на защищённость компьютера, так и по влиянию на его производительность.

Этап 1 – выбор средств антивирусной защиты для тестирования. На данном этапе необходимо помнить о том, что выбор продуктов тестирования не ограничивается степенью известности компании, разрабатывающей антивирусные продукты. При выборе необходимо учитывать наличие следующих параметров, влияющих на защищённость операционной системы:

- наличие широкой базы известных угроз;
- налаженный эвристический подход;
- предоставление сетевого экрана или интеграции в браузеры;
- защита от руткитов в реальном времени;
- сканирование по требованию;
- фоновое сканирование;
- автоматическое обновление базы данных угроз.

Для получения наиболее наглядных результатов следует составить таблицу, отражающую наличие у каждого антивирусного продукта параметров, названных выше.

Этап 2 – тестирование системы без установленных средств антивирусной защиты. Тестирование заключается в измерении времени, затрачиваемого на такие действия как:

- загрузка системы;
- архивация;
- разархивация;
- копирование файлов;
- открытие файлов;
- запуск программ;
- загрузка веб-страницы.

При выполнении данного пункта важно помнить, что каждый тест следует повторять трижды, для получения более точных результатов, а затем брать усреднённое значение.

Этап 3 – тестирование системы с каждым из выбранных средств антивирусной защиты по отдельности. Каждый тест, как и в случае с «чистой системой» следует повторять трижды, а затем брать среднее значение. На этом этапе необходимо помнить, что в итоговый результат попадут только два случая – пассивная и активная работа антивирусного продукта. Под пассивной работой антивирусного продукта понимается такое его состояние, в котором антивирус будет находиться большую часть времени. Под активной работой антивирусного продукта понимается такое состояние, при котором происходит сканирование или полная проверка системы. При наличии у антивирусной программы гибких настроек, следует изучить и зафиксировать максимальное количество возможных вариантов использования функций защиты. Затем следует определить, какие два варианта больше всего удовлетворяют потребностям пользователя и зафиксировать их. При тестировании активного режима работа антивирусного продукта также следует зафиксировать среднее время $\overline{t_s}$, затрачиваемое антивирусной программой на сканирование, для получения более точных результатов рекомендуется зафиксировать данный параметр как минимум 2 раза, а затем вычислить усредненное значение. Необходимо отметить, что если антивирусное средство при определённых настройках полностью блокирует выполнение одного из действий, стоит критически оценить важность данного действия для пользователя и, если важность оценена как «максимальная» или «выше среднего», то полностью исключить такое сочетание настроек из исследования. В случае, если

любое сочетание настроек блокирует выполнение определённых действий пользователя, оцененных по важности как «максимальная» или «выше среднего», то данное антивирусное средство следует полностью исключить из исследования.

Этап 4 – выбор весовых коэффициентов. Для дальнейшего изучения влияния антивирусов на производительность системы требуется определить приоритеты пользователя в отношении семи вышеупомянутых действий. Для этого при исследовании пассивного режима необходимо поставить в соответствие каждому действию цифры от 1 до 7, где 7 – самое важное действие, а 1 – наименее важное действие. Весовым коэффициентом конкретной операции считается число, равное выбранной цифре, разделённое на 28. Так, например, если пользователь оценил важность загрузки системы цифрой 6, весовой коэффициент данной операции будет равен $\frac{6}{28}$. При исследовании активного режима такой параметр как «загрузка системы» отсутствует из-за того, что при активной работе антивируса выключать компьютер нельзя. Исходя из этого, необходимо сопоставить цифры от 1 до 6 каждому действию. Весовым коэффициентом в данном случае будет считаться выбранное число, разделенное на 21. Если настройки антивируса блокируют определенные действия пользователя, оцененные цифрами ниже 5 (важность определена не как «максимальная» или «выше среднего»), то весовой коэффициент таких действий при расчете оценки влияния антивирусного средства на производительность операционной системы, необходимо считать равным 0.

Этап 5 – оценка влияния антивирусного средства на производительность операционной системы в пассивном и активном режимах. На данном этапе нужно произвести расчеты влияния антивируса на производительность, как в пассивном, так и в активном состоянии по формуле (1), приведенной ниже:

$$V = \sum_{i=1}^{N} (\frac{\overline{n_i}}{\overline{t_i}} - 1) * k_i * 100\%, \quad (1)$$

где V – влияние антивирусного продукта на производительность операционной системы Astra Linux, %; i – номер исследуемой операции; N – количество оцениваемых действий; $\overline{n_i}$ – среднее время, затраченное на выполнение i-ой операции с исследуемым антивирусным средством, с; $\overline{t_i}$ – среднее время, затраченное на выполнение i-ой операции на «чистой системе», с; k_i – выбранный весовой коэффициент для i-ой операции.

Этап 6 – расчет коэффициентов пассивного и активного режимов. Для расчета коэффициентов активного и пассивного режимов требуется оценить, сколько в среднем в день пользователь проводит за компьютером и как часто запускает полную проверку системы. Для вычисления коэффициентов пассивного и активного режимов требуется провести расчеты по формулам (2) и (3):

$$k_a = \frac{\overline{t_s} * r}{\overline{t_d}}, \quad (2)$$

где k_a – коэффициент активного режима, $\overline{t_s}$ – среднее время сканирования системы, ч; $\overline{t_d}$ – среднее время, которое пользователь проводит в день за компьютером, ч/д, r – параметр, отражающий раз в сколько дней проводится сканирование системы.

$$k_{\text{п}} = 1 - k_a, \quad (3)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент пассивного режима, k_a – коэффициент активного режима.

Этап 7 – общая оценка влияния антивирусного средства на производительность

операционной системы. На данном этапе необходимо определить общее влияние средства антивирусной защиты на производительность операционной системы Astra Linux, по формуле (4), приведенной ниже:

$$V_{\text{общ}} = V_a * k_a + V_{\text{п}} * k_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{общ}}$ – общее влияние антивирусной программы на производительность операционной системы Astra Linux, V_a – влияние антивирусного продукта в активном режиме, k_a – коэффициент активного режима, $V_{\text{п}}$ – влияние антивирусного продукта в пассивном режиме, $k_{\text{п}}$ – коэффициент пассивного режима.

Этап 8 – анализ результатов и составление рейтинга антивирусных программ. На данном этапе необходимо прибегнуть к таблице, составленной во время исполнения первого этапа. Данная таблица будет отражать влияние антивирусных программ на защищённость. Результаты, полученные при выполнении 7 этапа, будут отражать влияние антивирусных программ на производительность. На основании этих данных, а также на основании своих личных впечатлений, полученных в течение тестирования антивирусных программ, пользователь составляет свой собственный рейтинг антивирусных программ, где на первом месте оказывается наиболее подходящий ему продукт, а на последнем – наименее подходящий.

Для оценки качества методики было проведено экспериментальное исследование. В качестве исходных данных использовались операционная система Astra Linux, полные характеристики которой представлены на рисунке, а также антивирусные продукты Kaspersky Endpoint Security для Linux (версия 10.1.1.6421), Dr.Web для Linux (версия 11.1.1), Comodo (версия 1.1.268025.1), ClamAV для Linux (версия 0.102.2), F-PROT Antivirus for Linux Workstation (версия 6.2.3). Для тестирования были использованы скрипты, написанные на языке Python.

Рисунок. Исходные данные

Оценка влияния антивирусных программ в пассивном и активном режимах производится по формуле (1). Результаты проведенных расчетов в пассивном режиме представлены ниже в таб. 1. В качестве весовых коэффициентов для различных операций в пассивном режиме были выбраны:

– $\frac{7}{28}$ для загрузки веб-страницы;

- $\frac{6}{28}$ для запуска программы;
- $\frac{5}{28}$ для загрузки системы;
- $\frac{4}{28}$ для запуска файла;
- $\frac{3}{28}$ для архивации;
- $\frac{2}{28}$ для копирования файла;
- $\frac{1}{28}$ для разархивации.

Таблица 1

Влияние антивирусных программ на производительность в пассивном режиме

Антивирус	Влияние в пассивном режиме, %
F-PROT	33,29%
Comodo	27,69%
ClamAV	33,1%
Dr.Web	39,38%
Kaspersky	121,3%

Результаты проведенных расчетов в активном режиме отражены в таб. 2. В качестве весовых коэффициентов для различных операций в активном режиме были выбраны:

- $\frac{6}{21}$ для запуска программы;
- $\frac{5}{21}$ для загрузки веб-страницы;
- $\frac{4}{21}$ для запуска файла;
- $\frac{3}{21}$ для копирования файла;
- $\frac{2}{21}$ для архивации;
- $\frac{1}{21}$ для разархивации.

Таблица 2

Влияние антивирусных программ на производительность в активном режиме

Антивирус	Влияние в активном режиме, %
F-PROT	76,97%
Comodo	26,38%
ClamAV	110,14%
Dr.Web	94,05%
Kaspersky	451,93%

Расчеты коэффициентов активного и пассивного режима производятся по формулам (2) и (3). Среднее время, проводимое за компьютером каждый день $\overline{t_d}$ равно 8 часам, а параметр r, отражающий раз в сколько дней проводится проверка равен 0,5, что значит, что проверка проводится раз в два дня. Расчеты вычисления коэффициентов активного и пассивного режимов представлены в таб. 3.

Таблица 3

Расчеты вычисления коэффициентов активного и пассивного режимов

Антивирус	Среднее время сканирования, ч	Коэффициент активного режима	Коэффициент пассивного режима
F-PROT	0,39	0,024	0,976
Comodo	0,55	0,034	0,966
ClamAV	0,79	0,049	0,951
Dr.Web	1,3	0,081	0,919
Kaspersky	1,07	0,067	0,933

Расчеты по определению общего влияния антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux произведены в соответствии с формулой (4) и представлены в таб. 4.

Таблица 4

Расчеты влияния на производительность

Антивирус	Влияние в пассивном режиме, %	Коэффициент пассивного режима	Влияние в активном режиме, %	Коэффициент активного режима
Comodo	27,69	0,966	26,38	0,034
ClamAV	33,1	0,951	110,14	0,049
Dr.Web	39,38	0,919	94,05	0,081
Kaspersky	121,3	0,933	451,93	0,067

Общее влияние антивирусных программ на производительность представлено в таб. 5.

Таблица 5

Общее влияние антивирусных программ на производительность

Антивирус	Общее влияние на производительность, %
F-PROT	34,34
Comodo	27,65
ClamAV	36,87
Dr.Web	43,81
Kaspersky	143,45

На основании разработанной методики каждый пользователь операционной системы Astra Linux сможет качественно оценить влияние антивирусов на производительность операционной системы, а значит цель работы достигнута. Для повышения качества методики оценивания влияния антивирусных программ на производительность операционной системы Astra Linux в дальнейшем планируется использовать математическую статистику.

Литература

1. Dennis Technology Labs: Влияние антивирусов на производительность системы – 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.comss.ru/ page.php?id=2678 (дата обращения 2020-04-05).

Антропов Даниил Валерьевич
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
студент группы № К3421,
направление подготовки: 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
e-mail: antrodancraz17@gmail.com
Осипов Никита Алексеевич
Год рождения: 1972
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: nikita@ifmo.spb.ru

УДК 004.942

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Д.В. Антропов
Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.А. Осипов

Аннотация
В работе реализовано приложение, которое прогнозирует транспортный трафик на основе нейронных сетей. Рассмотрена предметная область, интеллектуальная транспортная система, проведен анализ основных параметров транспортных потоков, существующих приложений-аналогов и основных методов прогнозирования дорожного трафика.
Ключевые слова
Интеллектуальная транспортная система, транспортный поток, прогнозирование, нейронные сети, LSTM, обучающая выборка.

Проблема организации дорожного движения является общей для крупных городов и приводит к экономическим, экологическим и социальным проблемам. Поэтому существует потребность в системе прогнозирования трафика, которая может использовать методы анализа данных о транспортном потоке для решения задач транспортного планирования и логистики.

Сейчас уже имеются приложения, которые показывают загруженность дорог в текущий момент времени. Среди этих решений выделяются такие продукты, как Google Maps и Яндекс.Пробки. В упрощенном виде эти приложения работают следующим образом: они собирают данные у своих пользователей, отправляют их на сервер, где при помощи специального алгоритма эти данные обрабатываются. Далее новые данные редактируют карту пробок и отсылаются обратно пользователю. Но стоит отметить, что указанные приложения используют встроенные алгоритмы для обработки исторических данных и данных в реальном времени, а внедрение методов машинного обучения только планируется.

Благодаря тому, что нейронные сети являются очень мощным и гибким инструментом для прогнозирования нелинейных систем, и их популярность в разных сферах постоянно растет, то в данной работе будет рассмотрен прогноз плотности транспортного потока, построенный с помощью нейронной сети. Использование

нейронных сетей в задачах прогнозирования позволяет получать более точные предсказания. Одним из главных преимуществ нейросети является ее способность выявлять и строить сложные нелинейные зависимости, описывающие поведение системы. На основе этих зависимостей нейронная сеть способна обучаться, то есть изменить коэффициенты параметров, которые влияют на результат. Еще одним преимуществом нейросети является ее устойчивость к неполным данным, шумам, которые могут появиться из-за ошибок при сборе информации. С другой стороны, сложность алгоритмов нейросети не позволяет проверить, каким образом преобразуются входные данные, и, как следствие, такой подход может обернуться ложными результатами, ошибками и тупиками [1].

Одним из главных этапов построения нейронной сети является создание обучающей выборки. В данной работе используется выборка, составленная на основе информации о дорожном трафике Лондонских шоссе за 2014 год [2]. Данные собирались каждые 15 минут в течение года с помощью GPS. Преимущества этого датасета перечислены ниже:

- датасет доступен для общего пользования;
- датасет состоит из актуальных данных;
- данные сгенерированы отдельно для каждого месяца;
- в датасете присутствуют необходимые признаки;
- в каждом наборе находится достаточное количество примеров;
- датасеты собраны для разных дорог;
- для каждой дороги доступна информация за последние 5 лет;
- имеется документация, описывающая структуру датасета.

Выбранный набор имеет 35000 записей, среди которых встречаются ситуации как с плотным, так и со свободным потоком на участке дороги. На основе этой выборки были созданы тренировочный и тестовый датасет. Тренировочный датасет использует 80% обучающей выборки, тестовый – оставшиеся 20%. Валидационный тест представляет из себя данные об автомобильном потоке на участке трассы A20 за январь 2019 года и состоит из 3000 записей. Полученный датасет имеет структуру, показанную в таб. 1.

Таблица 1

Структура обучающей выборки

Название признака	Описание признака
Time	Дата и время измерения
Day Type ID	Тип дня
Total Carriageway Flow	Общее количество транспортных средств, обнаруженных на любой полосе
Speed Value	Средняя скорость потока
Intensity	Интенсивность потока, рассчитанная как количество автомобилей на участке дороги за один час.
Volume	Плотность потока, рассчитанная по формуле $\rho = q/v$, где q – интенсивность потока, v – средняя скорость потока.
Result	Ожидаемый результат на выходе нейросети: «0» - свободный поток; «0,5» - частично загруженный поток; «1» - загруженный поток.

Также важным этапом при проектировании нейронной сети является выбор ее архитектуры. Для создания сети прогнозирования транспортного потока было принято решение, использовать LSTM (Long Short-Term Memory, «сети долгой краткосрочной памяти») архитектуру. LSTM – это разновидность рекуррентных нейронных сетей, которая способна запоминать информацию на длительные периоды времени.

Выбор такой архитектуры обоснован тем, что она отлично подходит для задачи регрессии. Задача регрессии представляет собой формирование прогноза на основе временного ряда. В случае транспортного потока временной ряд будет описываться признаками потока, упорядоченными по дням. Так как на один момент времени приходится несколько признаков (количество транспорта на отрезок времени, тип дня, средняя скорость потока), то временной ряд будет многомерным.

Определив архитектуру нейронной сети, следует выбрать технологии для ее создания. Первое что стоит определить, это язык программирования. Так как нейросети стали достаточно популярны, то их реализация возможна почти на любом высокоуровневом языке. Однако наиболее востребованным языком в этой области является Python, который использовался в данной работе для реализации нейронной сети. Преимущество этого языка заключается в наличии множества библиотек для создания нейросетей. В работе были задействованы следующие библиотеки: NumPy, TensorFlow, Pandas, Scikit-learn и Keras [3].

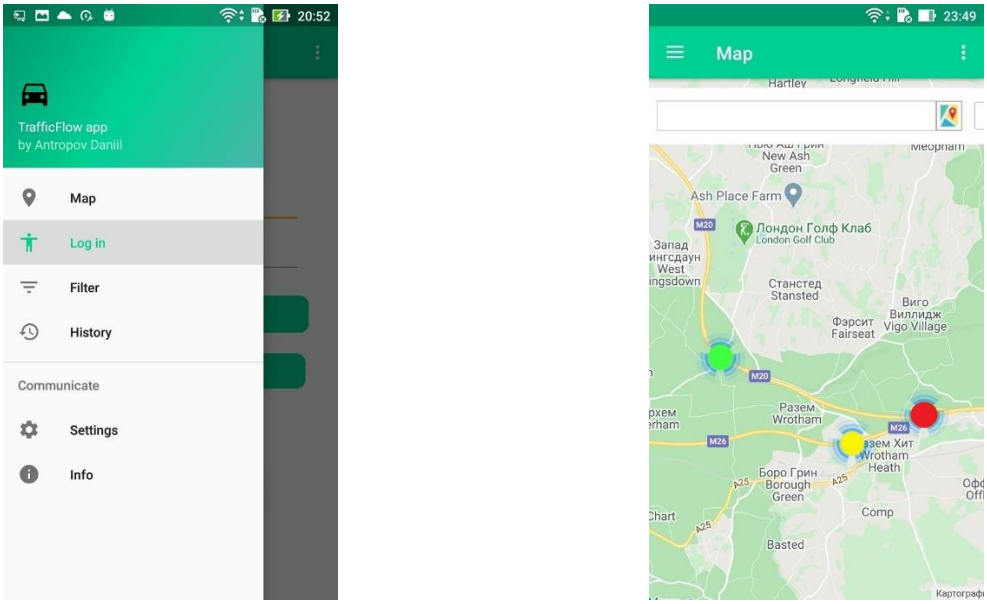
В качестве инструмента разработки использовался облачный сервис Google Colaboratory, используемый для создания моделей машинного обучения. Преимуществом данной платформы является возможность получения удаленного доступа к виртуальной машине совершенно бесплатно. На каждой машине можно подключить графический процессор (graphics processing unit, GPU), который предоставляет заметной преимущество перед центральным процессором (central processing unit, CPU) для обучения нейронных сетей, особенно с глубокой архитектурой. Чтобы разработчику было максимально удобно работать с Google Colaboratory, в ней предустановлены основные библиотеки, необходимые для работы с нейросетями [4].

Но нейронная сеть является лишь частью приложения, ведь оно должно отображать получаемые сетью результаты в удобном для пользователя виде. Для этой задачи было принято решение разработать мобильное клиент-серверное приложение под операционную систему Android. Выбор операционной системы Android обусловлен тем, что, по состоянию на 2020 год, 70% рынка мобильных приложений работают с этой ОС.

Клиентская часть приложения представлена мобильным приложением на основе операционной системы Android версии 9.0 Pie (API level 28) с минимально возможной версией 5.0 Lollipop (API level 21). Из всех возможных языков программирования для Android-приложений (C#, Java, Kotlin, Python) был выбран Kotlin, который по заявлению компании Google выбран предпочтительным для Android разработки. Kotlin – это достаточно молодой язык, который является кроссплатформенным и полностью совместимым с гигантом среди языков программирования – Java. Кроме того, Kotlin по свой простоте сравним с Python [5].

Android Studio версии 3.6 была выбрана в качестве среды разработки. Эта IDE также является официальной средой разработки мобильных приложений Android. Сам интерфейс приложения показан на рис. 1а и 1б.

На рис. 1а показано главное меню для навигации по приложению. На рис. 1б – карта, на которой отображаются результаты, выданные нейронной сетью. Как видно, на карте имеются 3 метки, характеризующие загруженность трафика. Цвет максимально просто отражает ситуацию на дороге: красный – высокая загруженность, желтый – средняя и зеленый показывает, что на данном участке свободный поток.



а б

Рис. 1. Интерфейс разработанного мобильного приложения:
меню навигации (а), карта пробок (б)

Чтобы разработать максимально эффективное приложение нужно было определить, насколько хорошо работает нейросеть. Для этого было обучено 3 модели, в которых отличалось только количество эпох, то есть сколько раз обучающая выборка проходила через нейросеть. Для обучения использовалось 150, 300 и 400 эпох. Лучшая модель определялась по наименьшему значению средней абсолютной ошибки MAE (mean absolute error), расчет которой представлен в формуле (1).

$$MAE = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^{m} |a_i - y_i|, \quad (1)$$

где m – общее количество записей;

ai – предсказанное значение плотности потока;

yi – фактическое значение плотности потока.

На основе полученных результатов была выбрана сеть, в которой использовалось 300 эпох. Так как ее значение ошибки равнялось 0,008, когда у других моделей этот показатель был немного выше. Результаты расчета MAE показаны в таб. 2.

Таблица 2

Результаты расчета MAE для обученных моделей

Модель нейронной сети с количеством эпох	Среднее значение MAE
LSTM_150	0.0096
LSTM_300	0.0080
LSTM_400	0.0083

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что модель, в которой использовалось 300 эпох, в среднем обеспечивает более высокую точность прогноза, чем 2 другие модели. Это может быть связано с тем, что использованное количество эпох для выбранной архитектуры и выбранной обучающей выборки является

оптимальным. Это позволяет нейронной сети использовать достаточное количество данных, чтобы качественно обучиться и не перенасытиться данными.

На рис. 2 показан результат работы нейросети.

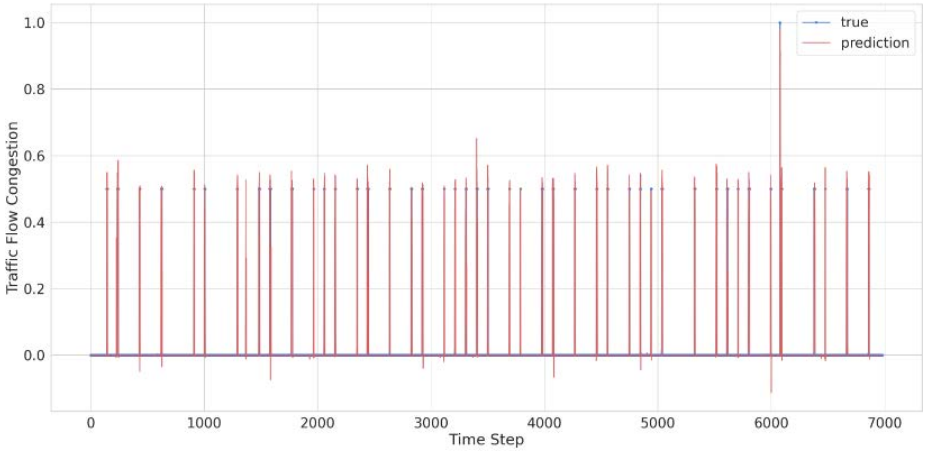


Рис. 2. Результат работы сети, в которой использовалось 300 эпох

Из рис. 2 видно, что нейросеть показала наиболее приближенные к действительности результаты на тестовой выборке. Однако разработанную модель можно совершенствовать, если использовать данные, собранные с городских дорог, где транспортный поток имеет поведение, отличное от дорожного трафика на автомагистралях.

Таким образом, для решения задачи прогнозирования транспортного потока, которая становится с каждым годом актуальнее из-за роста числа транспортных средств, целесообразно использовать нейронные сети, а именно сети LSTM. Учитывая тот факт, что существующие приложения, которые предсказывают ситуацию на дорогах, пока не используют методы машинного обучения, а прогнозируют на основе встроенных алгоритмов, то созданная в данной работе модель может конкурировать со своими аналогами. Преимуществом использования нейросети для прогнозирования трафика является ее возможность выявлять в процессе обучения сложные зависимости транспортного потока. Но для этого нужно обучать сеть на разнообразных данных и искать такие параметры сети, при которых полученные результаты будут максимально приближены к реальным.

Литература

1. Прогнозирование с помощью нейронных сетей. [Электронный ресурс]. URL: http://apsheronsk.bozo.ru/Neural/Lec9.htm (дата обращения 09.04.2020).
2. Highways England network journey time and traffic flow data. [Электронный ресурс]. URL: https://data.gov.uk/dataset/9562c512-4a0b-45ee-b6ad-afc0f99b841f/highways-england-network-journey-time-and-traffic-flow-data (дата обращения 25.04.2020).
3. ПО для машинного обучения на Python. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/company/jetinfosystems/blog/415997/ (дата обращения 3.05.2020).
4. Краткое руководство по работе с Google Colab. [Электронный ресурс]. URL: http://texno.info/etc/kratkoe-rukovodstvo-po-rabote-s-google-colab/ (дата обращения 10.05.2020).
5. Kotlin Programming Language. [Электронный ресурс]. URL: https://kotlinlang.org/ (дата обращения 15.05.2020).

Бейлин Максим Тимурович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
студент группы №K3420,
направление подготовки: 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи,
e-mail: icevenom98@gmail.com
Осипов Никита Алексеевич
Год рождения: 1972
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
к.т.н., доцент, доцент (квалификационная категория «доцент практики»),
e-mail: nikita@ifmo.spb.ru

УДК 004.052.2

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

М.Т. Бейлин
Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.А. Осипов

Работа выполнена в рамках темы НИР №107824 4677621 «Разработка программного комплекса для анализа надежности инфокоммуникационной системы с привлечением априорной информации».

Аннотация
В работе проведено исследование теории надежности систем, а также проведен обзор существующих программных комплексов для ее анализа. На основе полученных данных предложены универсальные способы для определения надежности ИКС, которые реализованы в программном комплексе, позволяющим проводить анализ надежности любой ИКС с привлечением априорной информации – статистики работы.
Ключевые слова
ИКС, надежность системы, безотказность, ремонтопригодность, анализ качества системы.

Введение

В настоящее время ИКС являются неотъемлемой частью любого предприятия и любой организации. От надежности ИКС напрямую зависит эффективность работы и прибыль компаний, поэтому важнейшей задачей при использовании ИКС является анализ её надежности. Из представленных на рынке программных комплексов, позволяющих проводить анализ систем, были рассмотрены наиболее популярные решения, применяемые компаниями по всему миру. В основном их отличия заключаются лишь в способах и методах занесения информации о системе, однако главным принципом анализа является моделирование ИКС и процесса её работы [1]. Данный подход является весьма трудоёмким, требовательным для пользователя, а также накладывает сильные ограничения на спектр исследуемых ИКС, т.к. требует большого количества настроек для каждой конкретной системы [2]. В приведенном в работе решении анализ надежности ИКС производится исходя из статистических данных, что позволяет исследовать любую ИКС в минимальные сроки и с

минимальными затратами.

Главной задачей, поставленной в ходе работы, являлось изучение теории надежности и качества ИКС в целом с целью выявления универсальных показателей систем для разработки методов определения надежности любой ИКС. Для определения надежности системы были рассмотрены всё её составляющие, которыми оказались безотказность, долговечность и ремонтопригодность [3]. Т.к. долговечность в конечном счете зависит от показателя безотказности (т.е. служит оценкой данному показателю во времени), в дальнейшем внимание было уделено безотказности и ремонтопригодности ИКС.

Безотказность — это свойство системы в течение продолжительного времени сохранять работоспособное состояние. Для обеспечения безотказности ИКС должна обладать определенным объемом ресурсов, позволяющим её обрабатывать максимальное возможное количество запросов к ней, исключая простои или выходы из строя и не ухудшая работу по остальным показателям. Таким образом, анализ системы по данному показателю может быть произведен на основе технического обеспечения системы, а также на основе статистики работы системы за определенный период времени.

Для статистического анализа показателя безотказности необходим расчет суммарного количества запросов и отказов за определенный период. При наличии явных пиков нагрузки и сбоев в работе ИКС безотказность определяется именно в такие промежутки времени. В общем виде безотказность рассчитывается по формуле (1):

$$\alpha = 1 - \frac{O}{N}, \quad (1)$$

где α – безотказность, O – количество отказов в единицу времени, N – количество поступающих запросов в единицу времени. Значение 1 соответствует полному отсутствию отказов в работе системы и является эталонным значением показателя. Чем меньше данный показатель, тем больше ошибок в работе ИКС, что свидетельствует о необходимости внесения изменений в конфигурацию системы. Хорошим показателем системы считается $\alpha_реал \geq 0{,}99$, то есть выполнение свыше 99% запросов.

Ремонтопригодность – это свойство системы, которое характеризует ее возможности по обнаружению отказов, повреждений и их причин, а также по возможности восстановления ее работоспособного положения. О степени ремонтопригодности следует судить по количеству и качеству маркеров-реакций на сбои, а также по времени и ресурсам, затрачиваемым на восстановление. Другими словами, исследование ИКС по данному показателю также представляется возможным с помощью анализа статистики работы системы, а также при помощи диалога с пользователем в роли эксперта по оценке состояния системы.

Для объективного анализа ремонтопригодности необходимо рассматривать данный показатель как совокупность всех его составляющих, что отражено в формуле для расчета безотказности (2):

$$R = \frac{T+A+D}{3}, \quad (2)$$

где T – время восстановления (рассчитываемое из статистических данных), A – точность определения (определяется на основе экспертного мнения), D – изменение отказоустойчивости (сравнение показателя безотказности за период до и после пика сбоев).

Дополнительной задачей разрабатываемого программного комплекса является

прогноз работы ИКС на основе собранной статистики и имеющейся о ней информации. Исходя из технического оснащения системы рассчитывается её пропускная способность, т.е. максимально возможное количество обрабатываемых запросов. Затем методом наименьших квадратов происходит аппроксимация имеющейся зависимости потока запросов во времени, что в итоге позволяет спрогнозировать количество отказов в будущем [4]. С целью минимизирования отказов ИКС необходимо составление оптимальной конфигурации, позволяющей уравнять пропускную способность системы и пиковое число запросов к ней.

Реализация алгоритмов

На основе выявленных способов анализа надежности ИКС выводится список функций, реализуемых в программном комплексе. На рис. 1 приведена диаграмма прецендентов, которая показывает функционал программы, необходимый для анализа надежности системы.

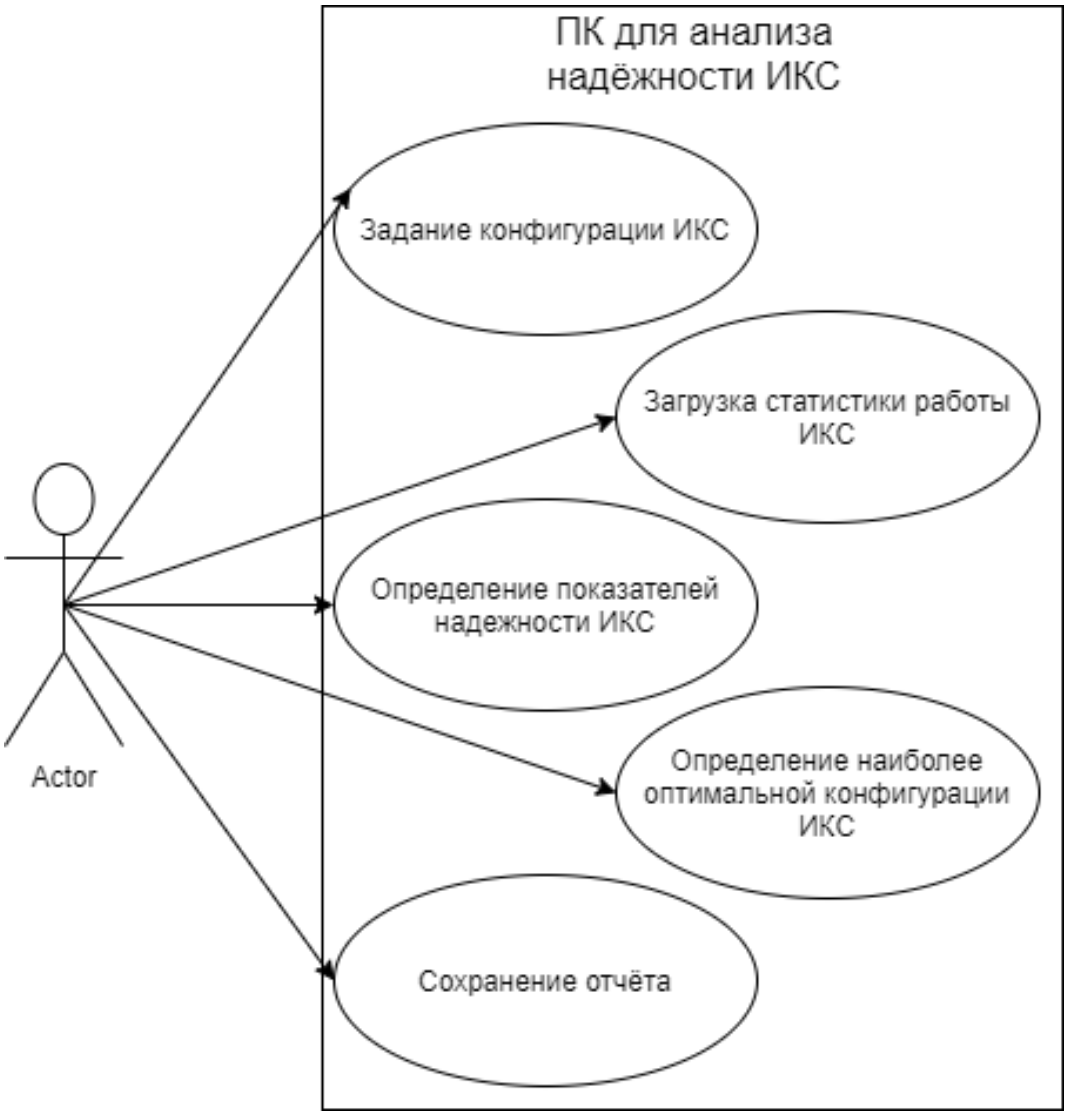


Рис. 1. Диаграмма прецендентов

Для перехода к этапу непосредственно разработки приложения на основе диаграммы вариантов использования была составлена UML диаграмма классов, которая представлена на рис. 2.

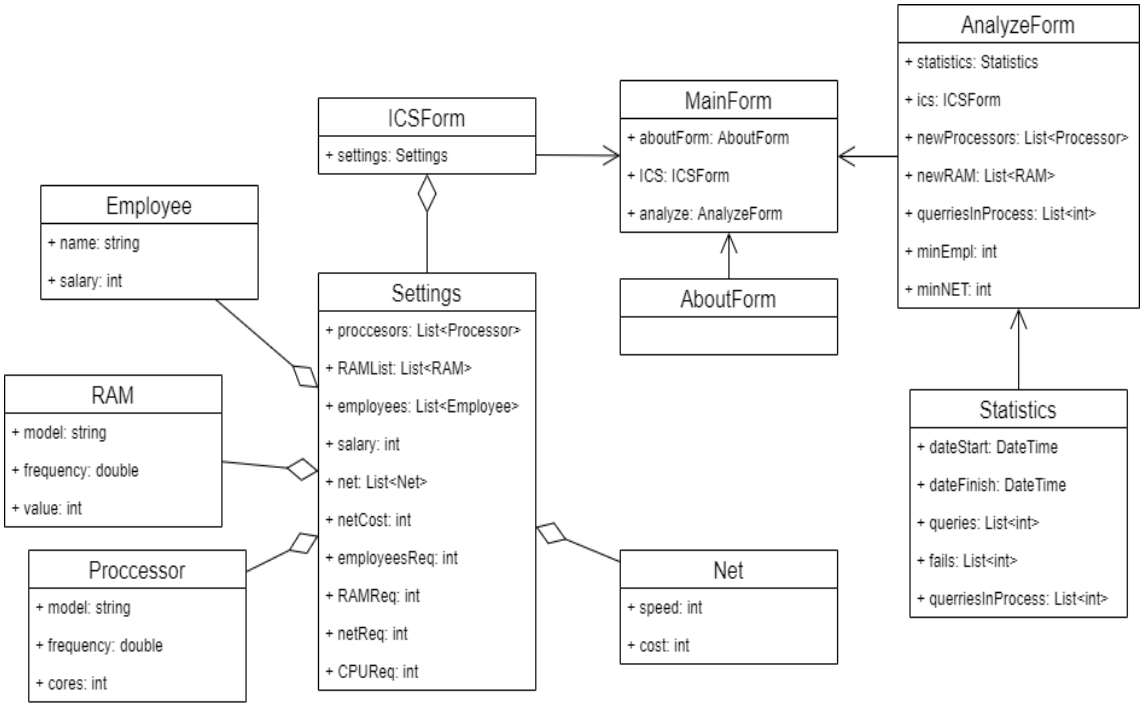


Рис. 2. UML диаграмма классов

- Класс MainForm. Является классом главной формы, которая содержит в себе в качестве полей три других формы приложения.
- Класс AnalyzeForm. Класс формы с анализом ИКС. Содержит в себе поля – списки оборудования, а также поле – Statistics (статистика работы ИКС). Ассоциирован с классом MainForm.
- Класс Statistics. Класс служит для содержания загружаемых пользователем данных о статистике работы (списки запросов и отказов). Ассоциирован с классом AnalyzeForm.
- Класс ICSForm. Класс формы настроек ИКС. Отвечает за внесение изменений в конфигурацию ИКС, а потому содержит в качестве поля объект Settings. Сам класс формы ассоциирован с классом главной формы.
- Класс Settings. Является классом-моделью для ИКС, содержащий в себе все составляющие конфигурации ИКС. Так как настройки ИКС должны быть сохраняемыми, класс является сериализуемым. Выгрузка и загрузка настроек осуществляется в виде файлов с расширением .XML. В качестве полей содержит объекты классов Employee, RAM, Proccessor, Net. Связь с этими объектами является агрегацией.
- Класс Employee. Класс, описывающий сотрудников.
- Класс RAM. Класс, описывающий характеристики ОЗУ.
- Класс Proccessor. Класс, описывающий характеристики ЦП.
- Класс Net. Класс, описывающий подключение с сети.

Для разработки программного комплекса был выбран язык C# и фреймворк .NET FRAMEWORK с технологией Windows Forms. Выбор данной технологии обусловлен наиболее удобным и доступным функционалом, а также содержанием исчерпывающего перечня готовых элементов управления для создания форм приложения.

Для каждой из основных функций программного комплекса были разработаны свои страницы приложения, которые реализованы в качестве модальных окон. Общий интерфейс главного окна приложения с графиком для анализа статистики работы системы представлен на рис. 3.

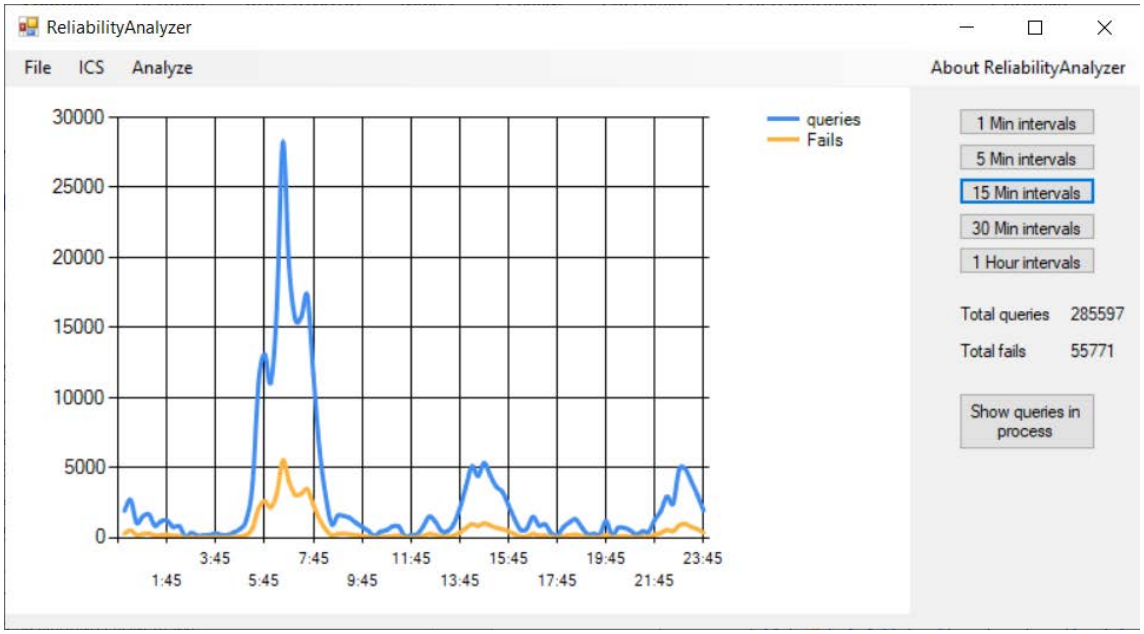


Рис. 3. Главное окно приложения

Результатами анализа и прогноза работы ИКС являются численные оценки показателей надежности ИКС, а также оптимизированная конфигурация, которую при необходимости пользователь имеет возможность применить к созданному профилю системы. Пример анализа статистических данных и технического оснащения системы приведен на рис. 4.

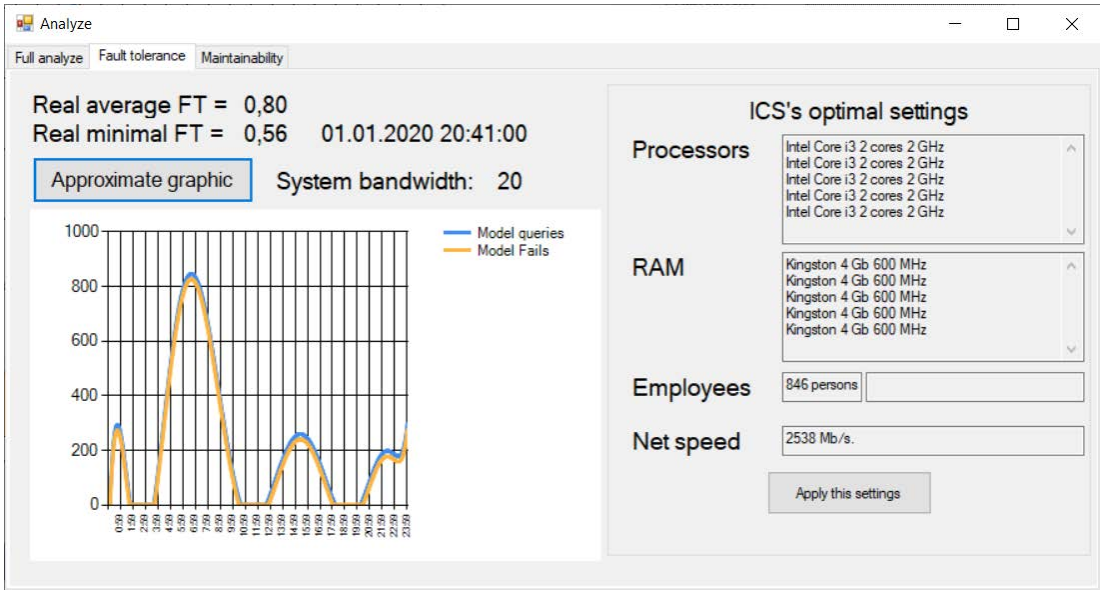


Рис. 4. Анализ надежности и применение изменений к конфигурации

Заключение

В данной работе были изучены подходы к анализу надежности ИКС, что позволило разработать и реализовать универсальные методы определения составляющих показателей надежности любой системы на основе заранее известных, т.е. априорных данных. Полученный программный комплекс пригоден для быстрого анализа любой ИКС при условии наличия информации о её оснащении и статистике её

работы. В дальнейшем необходимо рассмотреть возможности конвертации данных различного формата к виду, пригодному для анализа с целью упрощения эксплуатации комплекса. Также необходимо рассмотреть идею о внедрении алгоритмов машинного обучения, что может оказаться эффективным решением при поиске оптимальной конфигурации ИКС.

Литература

1. Шаламов А.В., Соловьев В.А. Обзор программных комплексов расчета надежности технических систем // Молодежный научно-технический вестник – № ФС77-51038 – 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docplayer.ru/30954919-Obzor-programmnyh-kompleksov-rascheta- nadezhnosti- tehnicheskih-sistem.html (дата обращения: 01.07.2020).
2. Брук П. ANSYS medini™ Analyze: модельно-ориентированный подход к процессам анализа функциональной безопасности, расчета надежности и ремонтопригодности / Брук П. // САПР И ГРАФИКА. Спецвыпуск «Геоинформационные системы». 2019. №3. С. 58-61.
3. Алаева С.С., Бобков С.П., Ситанов С.В. Администрирование в информационных системах: учеб. пособие / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2010. 52 с.
4. Среднеквадратичное приближение функций [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/131335/ (дата обращения: 02.07.2020).

Бенсон Екатерина Александровна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы №B3405,
направление подготовки: 12.03.02 – Оптотехника,
e-mail: ekaterina.benenson@gmail.com
Коняхин Игорь Алексеевич
Год рождения: 1953
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
д.т.н., профессор,
e-mail: iakoniakhin@itmo.ru

УДК 608.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОВОРОТА ОБЪЕКТА

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

Аннотация
Через интервал с красной строки приводятся аннотация статьи (5–6 строк) и ключевые слова. Аннотация и ключевые слова должны иметь: междустрочный интервал 1, шрифт Times New Roman – 11 пт. Ключевых слов должно быть не менее 5.
Во многих практических задачах требуется определение пространственного поворота объекта контроля, что определяет необходимость трёхкоординатных угловых измерений. В работе проектируется автоколлимационная система, способная измерять поворот объекта по трем координатам. Особенностью проектируемой системы является пирамидальный отражатель со специфичным четырехгранным углом при вершине.
Ключевые слова
Автоколлиматор, пирамидальный отражатель, угол скручивания, угловое положение объекта, светоделительный кубик.

Оптико-электронные приборы и системы всё чаще находят применение в разных областях науки и техники. Самыми важными сферами их работы являются мониторинг, контроль и также измерение расстояния до объекта и его линейного и углового перемещения. Вопрос безопасности и надёжности сооружений всегда актуален, в том числе, в строительстве, машиностроении, судостроении и инженерной геодезии. Для решения таких задач как контроль деформаций нагруженных частей промышленных транспортных сооружений, определение углового положения движущегося объекта необходима трехкоординатная система для угловых измерений.

В процессе аналитического обзора методов для угловых измерений рассмотрены следующие методы и системы, использующие их: метод прямого визирования и триангуляции – теодолит и лазерный трекер, интерференционный - интерферометр, автоколлимационный - автоколлимационный. В результате обзора сделан вывод, что автоколлимационный метод и автоколлимационная система наиболее точная и универсальная. Во второй части аналитического обзора рассмотрены автоколлимационные системы аналогичного функционального назначения, основным

их недостатком является невозможность измерять угол скручивания. Большинство систем двухкоординатные, поэтому в качестве аналога выбрано устройство для измерения углового положения объекта из патента. В качестве автоколлимационного отражателя используется триппель-призма с чувствительностью 0,06 к углу скручивания, в связи с этим одна из задач настоящей работы – доказать, что исследуемый пирамидальный отражатель имеет большую чувствительность [1, 3]. Цель работы спроектировать оптико-электронную автоколлимационную систему для измерения пространственного поворота объекта со следующими параметрами:

– рабочая дистанция – 5 метров,
– диапазон измерений коллимационных углов, не более – 10 угл. мин.,
– среднее квадратическое значение погрешности, не более – 2 угл. с.,
– диапазон измерений угла скручивания, не более – 1 угл. градус.,
– среднее квадратическое значение погрешности,
– измерения скручивания, не более – 20 угл. с.,
– среднее время безотказной работы не менее – 5000 час,
– питание – сеть, 220 В, 50 Гц.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести аналитический обзор методов и систем для измерения угловых перемещений,
- выбрать и обосновать структурную схему,
- провести габаритно-энергетический расчет элементов проектируемого ОЭА,
- исследовать пирамидальный отражатель,
- рассчитать параметры элементов электрической схемы питания светодиода,
- разработать конструкцию приемного блока автоколлиматора и конструкцию крепления отражателя к контролируемому объекту.

В основе проектируемой системы классическая автоколлимационная схема (рис. 1). Необходимо выбрать источник, приемник и объектив, что было сделано в процессе габаритно-энергетического расчета.

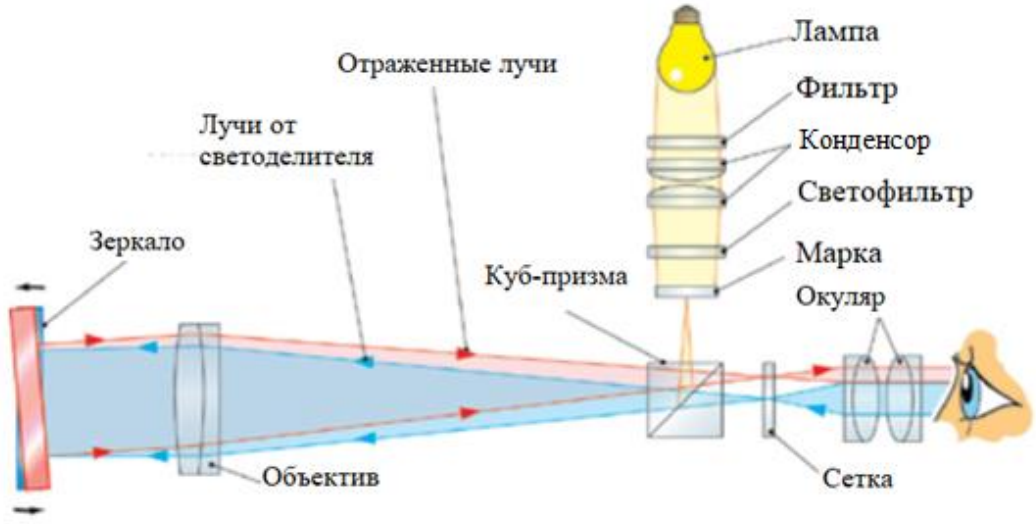


Рис. 1. Принцип работы автоколлимационного метода

Для выбора основных элементов произведен расчет минимального необходимого количества чувствительных элементов по следующей формуле:

$$b \geq \frac{\alpha}{\Delta\theta}. \quad (1)$$

На основе расчета по формуле (1) выбрана КМОП матрица LUPA3000 – CYILSN3000AA, работающая в диапазоне видимого излучения (рис. 2), с количеством элементов по горизонтали и вертикали 1696 и 1710 соответственно. Размер пикселя составляет 8 мкм [2].

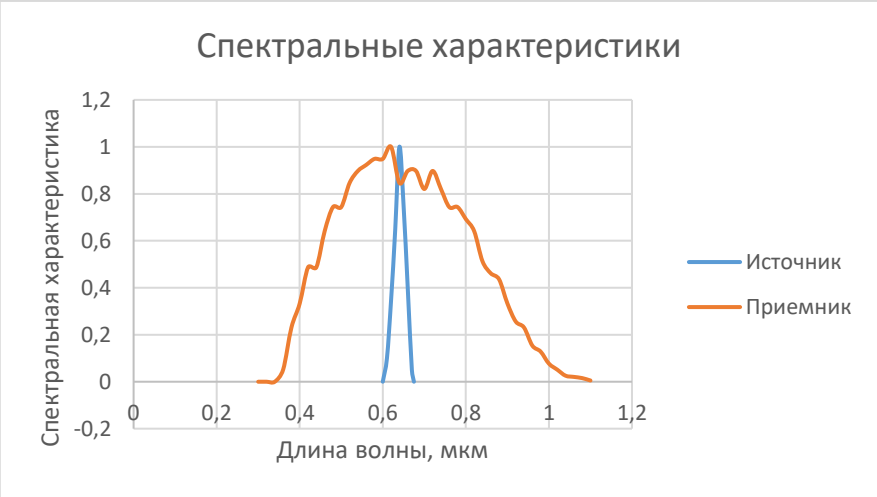


Рис. 2. Нормированные спектральные характеристики КМОП матрицы LUPA3000 – CYILSN3000AA и светодиода– L-1513SURC-E

На основе спектральной характеристики матрицы выбран источник излучения таким образом, чтобы максимальная интенсивность излучения совпадала с максимальной спектральной чувствительностью ПОИ (рис. 2). Выбранный светодиод – L-1513SURC-E – излучает с углом 20º, сила света I=2200 мкд, цвет излучения красный, спектральная характеристика M^{II} изображена на рисунке 4.2 [2].

В результате габаритно-энергетического расчета необходимо выбрать элементы системы таким образом, чтобы на ПОИ была обеспечена освещенность больше порогового значения. Для вычисления пороговой освещённости нужны такие параметры матрицы, как темновой сигнал $U_{\text{пор}}$ и чувствительность S_e^I:

$$E_{\text{пор}} = \frac{U_{\text{пор}}}{S_e^I}. \quad (2)$$

Пороговая освещенность ПОИ по формуле (2) 57 млк, необходимое соотношение сигнал/шум, при котором значение погрешности измерения любого параметра не превышает допустимого μ=1000, в связи с этим освещенность на ПОИ должна превышать 57 лк.

$$E' \geq E_{\text{пор}} \cdot \mu = 57 \text{ [лк]}. \quad (3)$$

Для выбора объектива необходимо знать минимальное относительное отверстие и максимальное и минимальные фокусные расстояния. Относительное отверстие рассчитывается по следующей формуле:

$$\frac{D}{f'} = \sqrt{\frac{E \cdot 4}{\tau^2 \cdot \tau_{\text{ос}}{}^2 \cdot L_{\text{ИОИ}\upsilon} \cdot \pi}}, \quad (4)$$

где τ – коэффициент пропускания среды $\tau = 0{,}9$; τ_{oc} – коэффициент пропускания

оптической системы (делителя $\tau_{дел} = 0{,}5$ и объектива $\tau_{об} = 0{,}8$) $\tau_{ос} = \tau_{дел} \cdot \tau_{об}$; $L_{ИОИ\,\upsilon}$- яркость источника оптического излучения; D – диаметр входного зрачка; *f'* – заднее фокусное расстояние объектива.

Максимальное фокусное расстояние рассчитано на основе максимального угла поворота отражателя и величины матричного ПОИ по горизонтали:

$$f'_{max} \leq \frac{h}{2 \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}, \tag{5}$$

где $h = n \cdot d$, n – количество элементов по горизонтали, ε/2 – максимальный угол поворота отражателя.

Минимальное фокусное расстояние рассчитывается на основе допустимых линейной и угловой погрешностей:

$$f_{min} = \frac{\sigma}{\Delta\vartheta \cdot 2}, \tag{6}$$

где σ – линейная погрешность измерения, $\Delta\vartheta$ – угловая погрешность измерения.

На основе расчетов по формулам (4), (5) и (6) выбран объектив Гелиос-104, *f'*=174 мм, *F*=2.9, 2ω=30º.

После выбора основных элементов проведен габаритно-энергетический расчет проверяющий выполнения условия (3). Для проверки рассчитаны коэффициенты пропускания проекционного канала с учетом потерь при расходимости пучка и потерь при виньетировании. Таким образом реальная освещенность ПОИ рассчитана по следующей формуле:

$$E = \pi \cdot \tau \cdot L_{ИОИ\,\upsilon} \cdot sin^2\sigma', \tag{7}$$

где τ – коэффициент пропускания проекционного канала автоколлиматора, *L* - яркость излучения в плоскости марки, σ′- апертурный угол объектива в пространстве изображений $sin\,\sigma' = \frac{D_{об}}{2f_{об}} = \frac{60}{348} = 0.172$.

Полученная освещенность по формуле (7) равна 458 лк, значит необходимое отношение сигнал/шум обеспечивается.

В процессе исследования пирамидального отражателя были измерены его габариты, построена 3D модель и рассчитаны двугранные углы при вершине, они равны 54º42’ и 54º37’ (рис. 3).

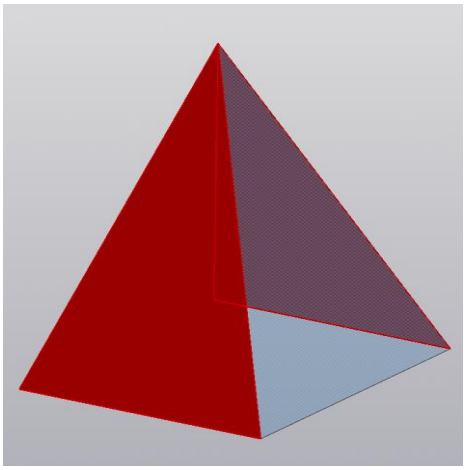


Рис. 3. Внешний вид исследуемого пирамидального отражателя

Выходной пучок может быть описан с помощью следующего выражения:

$$\mathrm{B} = \mathrm{M_r} \cdot \mathrm{M}_{\frac{\pi}{6}+\varphi} \cdot \mathrm{M_r^T} \cdot \overline{\mathrm{A}}, \quad (8)$$

где $\mathrm{M}_{\frac{\pi}{6}+\varphi}$ – матрица действия зеркально-призменной системы; $\overline{\mathrm{A}}$ – вектор падающего на отражатель луча $\overline{\mathrm{A}} = [0,0,-1]^T$ $\mathrm{M_r}$ – обобщённая матрица преобразования координат [4, 5].

Матрица действия отражателя в свою очередь зависит от матрицы действия воздушного отражателя M и матрицы действия эквивалентной клиновидной пластины $\mathrm{M'_{кл}}$:

$$\mathrm{M}_{\frac{\pi}{6}+\varphi} = \mathrm{M'_{кл}} \cdot \mathrm{M}. \quad (9)$$

Рассчитав матрицу действия отражателя по формуле (9) и подставив значения в формулу (8), получена матрица отраженного пучка:

$$\mathrm{B} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $c_1 = \gamma - \theta_2\left(\gamma^3 N + \frac{\gamma^2 N^2}{2} + \frac{\gamma^2}{2} - 1\right) + 2\gamma^2 N - \frac{\gamma^3}{6} - \frac{\gamma^3 N^2}{2} - \theta_2(\gamma^3 N + \frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma^2 N}{2} - 1)$,

$c_2 = \theta_1\left(\gamma^3 N + \frac{\gamma^2 N^2}{2} + \frac{\gamma^2}{2} - 1\right) + \theta_1\left(\frac{\gamma^2 N^2}{2} - 1\right) + \theta_3\left(2\gamma^2 N - \frac{\gamma^3}{6} + \frac{\gamma^3 N^2}{2} + \gamma\right)$,

$c_3 = -\theta_2\left(\gamma + 2\gamma^2 N^2 - \frac{\gamma^3}{6} - \frac{\gamma^3 N^2}{2}\right) - \frac{\gamma^2}{2} - \gamma^3 N - \theta_2\left(2\gamma^2 N + \frac{\gamma^3 N^2}{2} - \frac{\gamma^3}{6} + \gamma\right) + \frac{\gamma^2 N^2}{2} + 1.$

Очевидно, что в нее входят все три составляющие углового движения - θ_1, θ_2 – коллимационные углы, θ_3 – угол скручивания, значит измерения угла скручивания возможно. Чувствительность измерения угла скручивания рассчитывается следующим образом:

$$S = \mathrm{M}_{\frac{\pi}{6}+\varphi} \cdot \overline{\mathrm{A}} \quad (11)$$

Согласно расчетам по формуле (11) чувствительность пропорциональная $sin\,6\varphi \approx 0{,}27$, она почти в 10 раз выше чувствительности триппель-призмы, исследуемой авторами патента. Рабочая дистанция L = 5м, диаметр объектива, принимающего отраженный луч $D_{об}$ =60 мм. Для того, чтобы отраженный луч был принят и была возможность измерить угол скручивания, необходимо учесть вынос пучка. Вынос пучка можно рассчитать по следующей формуле:

$$H = tg(6\varphi) \cdot L \quad (12)$$

Вынос пучка H равен 1,42 м, его необходимо учесть при разработке оптической и структурной схем, а также конструкции приемного блока. Из-за большого выноса система требует дополнительные приемные каналы.

В ходе работы были рассчитаны параметры элементов схемы питания светодиода: выбран резистор металлоксидный МО-50 (С2-23) мощностью 0,5 Вт и разработана электрическая принципиальная схема.

На основе выбранных элементов системы в программной среде MatLab были смоделированы разные факторы, влияющие на погрешность измерения угловых

координат объекта: погрешность фокусного расстояния объектива, погрешность выполнения двугранного угла отражателя и влияние шумов матрицы (рис. 4-6).

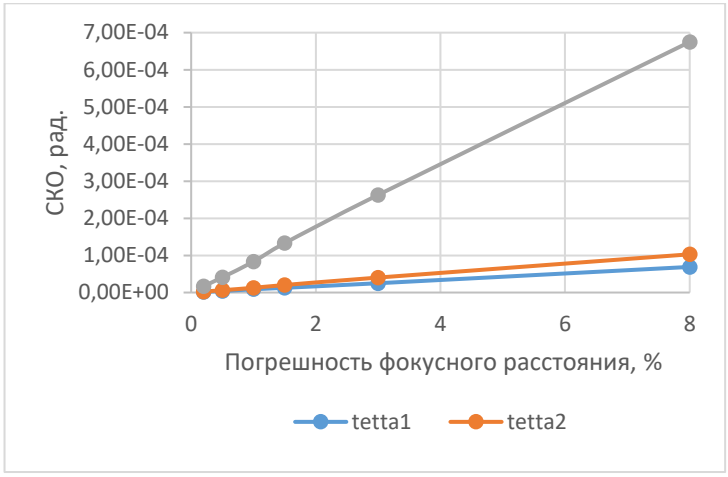


Рис. 4. Степень влияния погрешности фокусного расстояния на измерение угловых координат объекта

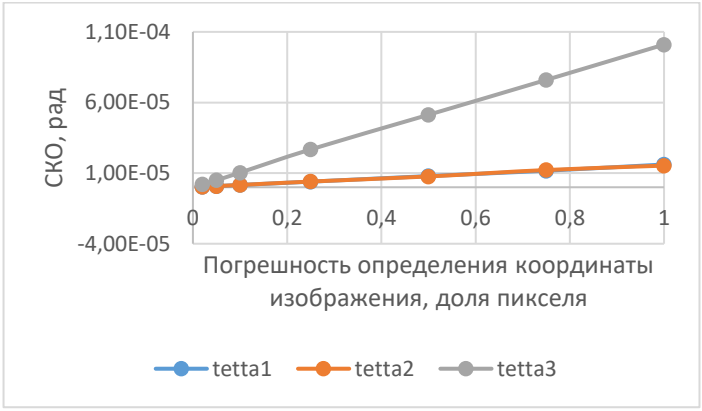


Рис. 5. Степень влияния погрешности измерения координаты изображения на измерение угловых координат объекта

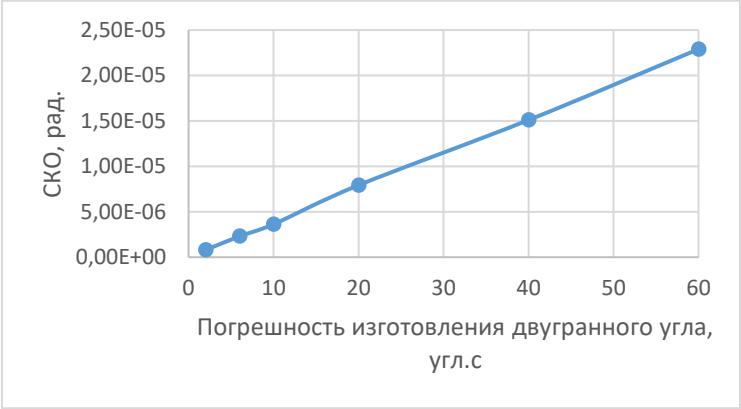


Рис. 6. Степень влияния на измерения угла скручивания погрешности изготовления двугранного угла призмы

По приведенным графикам видно, что минимальные погрешности $\theta_1 = 0{,}36'', \theta_2 = 0{,}55'', \theta_3 = 3{,}6''$.

В процессе работы были также разработаны сборочные чертежи приемного блока и крепления отражателя к контролируемому объекту, а также собран экспериментальный образец (рис. 7).

Рис. 7. Внешний вид экспериментального образца
пирамидального отражателя с креплением к контролируемому объекту

В результате работы были выполнены все поставленные задачи: выполнены аналитические обзоры методов и систем для измерения углового движения объекта? в результате выбран наиболее точный и универсальный метод; исследован пирамидальный отражатель и доказана возможность использования его для измерения углового положения объекта по трем координатам; рассчитаны параметры элементов схемы питания светодиода – разработана электрическая принципиальная схема, проведен точностной расчет – погрешности удовлетворяют требованиям ТЗ, а также разработаны сборочные чертежи приемного блока и крепления пирамидального отражателя к контролируемому объекту.

Литература

1. Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Копылова Т.В., Коняхин А.И., Серикова М.Г. Устройство для контроля поворота объекта [Электронный ресурс]. http://www.freepatent.ru/patents/2471148. (дата обращения: 13.12.2017).
2. Магазин измерительных приборов, электронных компонентов, паяльного оборудования и т.д. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.chipdip.by/ (дата обращения: 15.12.2019).
3. Андреев А.Л., Коротаев В.В. Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей // Приборостроение. 2010. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ osobennosti-rascheta-optiko-elektronnyh-sistem-pozitsionirovaniya-na-osnove-gotovyh-televizionnyh-moduley (дата обращения: 15.12.2019).
4. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. изд-во «Машиностроение». 1968. 292 стр.
5. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.library.ugatu.ac.ru/pdf/teach/Latyev_Konstr_tochn_prib_2izd_2015.pdf (дата обращения: 15.12.2019).

Бобко Руслан Александрович
Год рождения: 26.01.1999
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
студент группы № R3425,
направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника,
e-mail: ruslanbobko99@gmail.com
Чепинский Сергей Алексеевич
Год рождения: 07.10.1978
Университет ИТМО,
факультет систем управления и роботехники,
доцент (квалификационная категория "ординарный доцент"),
e-mail: chepinsky; s@hotmail.com

УДК 681.1

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МУЛЬТИСТРОЧНОГО ДИСПЛЕЯ БРАЙЛЯ

Р.А. Бобко
Научный руководитель – доцент С.А. Чепинский

Аннотация
Рассмотрена задача разработки конструкции мультистрочного дисплея Брайл с механической фиксацией положения точек. В отличие от классических дисплеев, использующих пъезоактуаторы, рассматриваемое устройство представляет из себя неполноприводную систему, что позволяет существенно уменьшить количество используемых акутаторов, и, как следствие, габариты устройства и ток потребление по сравнению с аналогами. Такой подход позволяет отображать текст в несколько строк одновременно без увеличения габаритов устройства.
Ключевые слова
Технологии для слабовидящих, мультистрочный дисплей Брайля, шрифт Брайля, методы отображения шрифта Брайля, многоканальная система передачи связи.

Введение

В настоящее время проблема создания комфортной среды инвалидов по зрению остро стоит практически во всех государствах, в частности и в России. Так, например, не смотря на то, что получение среднего образования детьми, в России является обязательным, фонд печатной литературы по всей стране насчитывают всего 72 специализированных библиотек для инвалидов по зрению. Во многом это обусловлено эксплуатационными сложностями при чтении книг Брайля: они требуют специальной бумаги, занимают много места и быстро истираются в процессе чтения процесса печати шрифтом Брайля.

Таким образом, наибольшую популярность заработали дисплеи Брайля, которые отображают текст в реальном времени и лишены недостатков Бумажный книг. Однако такие дисплеи ограниченны количеством отображаемых символов Брайля (от 24 до 80, наиболее распространены модели на 40 символов) и отображают текст только в одну строчку. Эти ограничения обусловлены использованием пъезокристалов в качестве актуаторов и приводит к высокой (более 100 000р) стоимости продукта.

На рис. 1 ниже представлена ячейка Брайля, для актуирования каждой точки которой используется независимый пъезокристал и усиливающее звено в виде рычага

(так как расширение пъезокрисала – мало и составляет около 1%). Таким образом размер ячейки ВхШхД 30х9,3х80 мм.

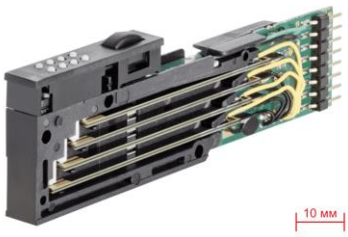


Рис. 1. Ячейка Брайля

Вышеописанные габариты не позволяют использовать пъезокристалы в качестве актуаторов в мультистрочном дисплея Брайля.

В данной работе рассмотрены технологии отображения с использованием различных актуаторов. Все они, по той или иной причине не подходят для решаемой задачи. Их краткая класификация представлена ниже:

- Электромагнитные
- Пневматические
- Механические
- С памятью формы

Электромагниты не применимы для решения данной задачи по причине больших габаритов что хорошо иллюстрируется на примере прототипа планшета для навигации Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL), минимальное расстояние между точек которого превышает 1 см что исключает применение этой технологии для отображения шрифта Брайля согласно ГОСТ 56832-2015[1] . Более того, даже при многоступенчатом размещении соленоидов как в разработке Stanislav-a Simeonov-a не удается удовлетворить заданные требования (Stanislav Simeonov, 2013).

Предлагаемое решение двухпозиционных соленоидов компании BRICON SC0323L с габаритами 7х8.4х23 мм привышает требуемые размеры почти в двое. Иллюстрация размещения соленоидов представлена ниже (рис. 2).

Рис. 2. Компоновка двухпозиционных соленоидов

Более того, такая компоновка приведет к существенному увеличению толщины (более 70мм), и веса (каждый соленоид весит 6 грамм, то есть около 1,5 кг для отображения 40 символов) устройства. Таким образом использование соленоидов исключено.

[1] ГОСТ 56832-2015 Р Шрифт Брайля. Требования и размеры, 2015.

Пневматические актуаторы для использовались учеными Университета Мичиган которые в 2016-м году представили прототип пневматического дисплея Брайля. Такая технология позволяет достичь заданных размеров шрифта Брайля, однако не применима для портативных дисплеев так как требует обширную пневматическую систему (рис. 3).

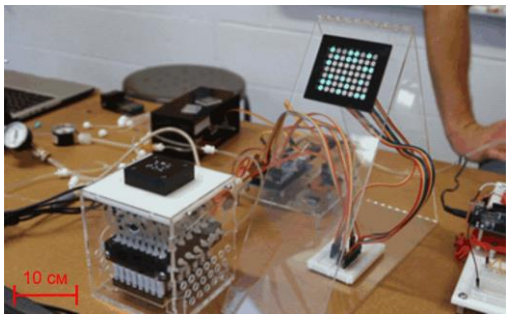


Рис. 3. Дисплей Брайля с пневматическими актуаторами

Одной из самых подходящих для данной задачи технологий отображения (помимо пъезоактуаторов) является применение материалов с памятью формы (например, сплав никель-титан) однако использование такой технологии затруднено при большом количестве отображаемых точек так как помимо производственных сложностей и цены такие актуаторы имеют существенное потребление тока (300 мА на каждую точку Брайля) а время актуации (более 3 с) (Chaves, D. R., Peixoto, I. L., Lima, A. C. O., Vieira, M. F., & de Araujo, C. J. (2009). Microtuators of SMA for Braille display system. 2009 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications. doi:10.1109/memea.2009.5167956).

В качестве механических актуаторов можно выделить шаговые двигатели с винтовой передачей как например в патенте российского исследователя Беломоева (Россия Патент № 2016147556, 2016). Однако предложенная конструктивная идея тяжело осуществима ввиду габаритов моторов и не исключает проблемы с необходимостью большого количества актуаторов (так как каждая точка предполагает использование назависимого шагового двигателя).

Таким образом, после детального анализа существующих решений и выявления их недостатков была выдвинута задача разработки модели портативного мультистрочного дисплея Брайля, удовлетворяющего всем требованиям по отображению шрифта Брайля прописанных в ГОСТ 56832-2015.

Для решения поставленной задачи был выбран механический способ отображения шрифта Брайля, с фиксацией положение точки. Таким образом стало возможным создать многоканальную неполноприводную систему, то есть существенно уменьшить количество используемых актуаторов и тем самым уменьшить габариты и потребляемый ток.

Предложенное решение

Для отображения шрифта Брайля используется система из актуаторов и механических элементов (защелок). Актуаторы представляют из себя шаговые моторы, закрепленные на подвижной пластине. Поочередное фиксирование точек за счет переводом защелок в нужное положения, формирует рельеф книги. Таким образом страница и обновляется построчно одновременно поднимаются сразу несколько точек. Такой подход позволяет обеспечить комфортное чтение при даже для уверенного пользователя шрифта Брайля (120 слов в минуту (Russomanno, A., O'Modhrain, S., Gillespie, R. B., & Rodger, M. W. M. (2015). Refreshing Refreshable Braille Displays. IEEE

Transactions on Haptics, 8(3), 287–297. doi:10.1109/toh.2015.2423492)), так как последующие строки будут обновляться во время чтения предыдущих строк. Таким образом пользователь ожидает обновления только первой строки

Рассмотрим принцип фиксирования точки (рис. 4).

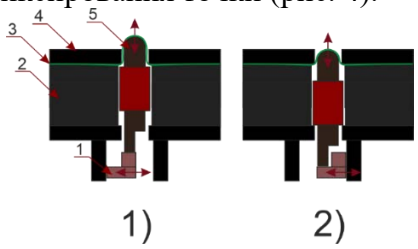


Рис. 4. Активное и неактивное состояние(положение) точек

На рис. 4 изображен схематический процесс перехода точки из выпуклого (активного) состояния в неактивное. Под действием латексной мембраны (на рисунке изображена под номером 3) точка (5) давит на защелку (1) которая выступит в роли опоры, если находится в крайнем левом положении. При переводе защелки в крайнее правое положение точка теряет опору под действием мембраны опускается вниз, то есть переходит в неактивное положение. В качестве направляющей для точки выступает пластина (2). Таким образом, точка фиксирована механически и актуатор необходим только для перевода защелки в неактивное состояние.

Однако при такой конструкции возможен только односторонний переход из активного состояния в неактивное. То есть, при начальном положении всех точек Брайля в активном состоянии возможно обновление страницы путем перевода соответствующих точек в неактивное положение. Для сброса (перевода обратно в активное положение) всех точек страницы необходимо поднять все точки Брайля после чего перевести защелки в крайнее левое положение. Для этого предусмотрен еще одни эластичный элемент, представляющий из себя полиуретановую нить без оплетки «Спандекс», зависимость растяжения от приложенной силы близка к линейной при этом допустимые растяжения достигают 300%. Которая воздействует на каждую защелку независимо, переводя ее в крайнее левое положение (при условии, что соответствующая точка поднята). На рис. 5 представлен переход из неактивного состояния точки в активное (вид сверху).

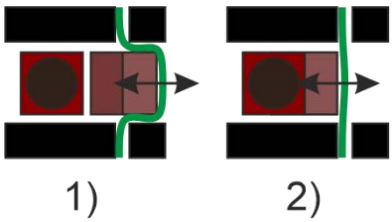


Рис. 5. Действие эластичного элемента на защелку

Из рис. 5 видно, что защелка переходит в крайнее левое положение при поднятой точке, в противном же случае, она упирается в саму точку. Таким образом исключается самопроизвольный переход из неактивного состояния в активное. Более того, данный переход можно осуществить одновременно для всех точек за счет одновременного их поднятия, например, пластиной (рис. 5)

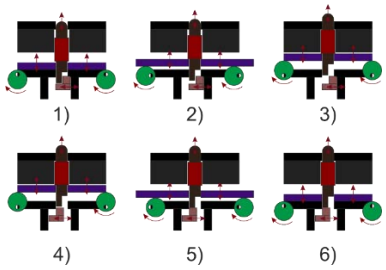


Рис. 6. Процесс обновления страницы Брайля

На рис. 6 два эксцентрика (выделены зеленым цветом) находятся в постоянном контакте с пластиной, обновляющей страницу (выделена синим цветом). Таким образом вращательное движение вала на котором закреплен эксцентрик передается в возратно-поступательное движение пластины, которая в свою очередь поднимает все точки и тем самым дает возможность защелкам занять крайние левые положения. После полного оборота эксцентрика пластина возвращается в исходное нижнее положения и система принимает первоначальное состояние. Общий вид системы представлен на рис. 7 ниже:

Рис. 7. Общий вид устройства

По ходу движения пластины с моторами ползун шаговых моторов упирается в соответствующую защелку или проходит свободно между строчками. Таким образом, можно актуировать только необходимые точки и использовать любое необходимое количество моторов (минимальное количество равно количеству отображаемых строчек). На рис. 8 ниже показан процесс перевода точки с активного состояния в неактивное.

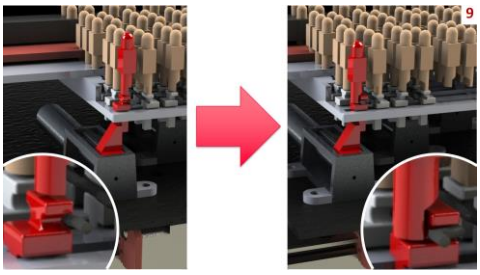


Рис. 8. Актуирование точки

Такое расположение актуаторов позволяет существенно сократить габариты устройства: размеры книги с отображением 448 символа (16 строк по 28 символов)

составляет ВхШхД 40х208х291 мм. При этом размеры отображаемого текста 169х183 мм.

Также при таком подходе существенно упрощаются производственные процессы изготовления составляющих дисплея: большая часть деталей представляет из себя пластины, которые могут изготовляться из листов полиметилметакрилата (органического стекла) с помощью лазерной резки, остальные же компоненты можно изготавливать путем литья двухкомпонентного полиуретанового пластика, что позволяет изготовить прототип, не прибегая к услугам специализированных заводов.

В качестве актуаторов были выбраны шаговые двигатели. Такой выбор обусловлен несколькими факторами. Во-первых, так как представленный девайс представляет из себя многоканальную систему, наличие обратной связи существенно усложнило бы управление, обработка положения посредством энкодеров значительно нагрузило бы микроконтроллер и увеличило бы число используемых выводов микроконтроллера, что в нашем случае критично. Во-вторых, система подразумевает достаточно точного позиционирования, таким образом использовать любой электродвигатель без обратной связи нельзя, из-за возможного перерегулирования. Так как шаговые моторы отличаются точным позиционированием, и надежностью, использование этого вида моторов удовлетворяет всем выдвинутым требованиям для решения нашей задачи. Явление проскальзывания шага в нашем случае отсутсвует, так как система является ненагруженной. Более того, любые явления накопления ошибки, устраняются за счет позиционирования ползуна в крайние положения.

Однако использование биполярного шагового двигателя накладывает ряд ограничений. Такие моторы требуют 4 управляющих вывода макроконтроллера по два на каждую фазу.

Таким образом использование большого количества моторов (больше пяти) приведет к нехватке выводов микроконтроллера (рис. 9).

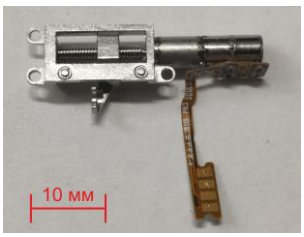


Рис. 9. Шаговый мотор с винтовой передачей

Решение этой проблемы достигается за счет использования сдвиговых регистров, например 8-и битного сдвигового регистра SN74HC595 (Instruments, 2015). Данное устройство удобно в управлении и отличается доступностью. Обновление сдвигового регистра происходит по шине SPI с частотой до 25-29 МГц. Большинство микроконтроллеров имеют встроенный интерфейс SPI работающий в пределах этих частот. Такой скорости обновления более чем достаточно с учетом того, что используемые электродвигатели поддерживают скорость вращения до 1500 шагов в секунду.

Заключение

В данной работе предложена оригинальная конструкция тактильного дисплея Брайля. Особенность которой заключается в возможности отображать шрифт Брайля в несколько строк без существенного увеличения габаритов устройства. Данная конструкция удовлетворяет всем требованиям ГОСТа 56832-2015 и может применяться для личного использования, как и классические дисплеи с пъезокристалами. Отказ от

использования пъезокристалов в данной работе был сделан ввиду их дороговизны и невозможности организовать мультистрочное отображение информации. Приоритет дальнейших исследований состоит в создании прототипа устройства и синтезе многоканальной неполноприводной системы управления, а также реализации управляющей программы и уточнении конечной конструкции устройства.

Литература

1. Stanislav Simeonov N.S. «Graphical Interface for Visually Impaired People Based on Bi-stable Solenoids». The International Journal of Soft Computing and Software Engineering [JSCSE]. Vol. 3. No. 3. Special Issue. 2013.
2. Chaves D.R., Peixoto I.L., Lima A.C.O., Vieira M.F., & de Araujo C.J. 2009. Microtuators of SMA for Braille display system. 2009 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications. doi:10.1109/memea.2009.5167956.
3. Беломоев Ф.В. Устройство и способ приёма и передачи информации посредством шрифта брайля. Россия. Патент 2016147556. 12 май 2016.
4. Russomanno A., O'Modhrain S., Gillespie R.B., & Rodger M.W. M. 2015. Refreshing Refreshable Braille Displays. IEEE Transactions on Haptics. 8(3). 287–297. doi:10.1109/toh.2015.2423492.
5. T. Instruments, SNx4HC595 8-Bit Shift Registers datasheet. 2015.

Богданов Константин Сергеевич
Год рождения: 1989 года,
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы № 3454,
направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность,
e-mail: 89817011070@mail.ru
Пирожникова Ольга Игоревна
Год рождения: 1989
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
к.т.н., доцент (квалификационная категория "ординарный доцент"),
e-mail: O.pirozhnikova10@gmail.com

УДК 004

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЭКО ПАРК»

К.С. Богданов
Наусный руководитель – к.т.н., доцент О.И. Пирожникова

Аннотация
В рамках работы разработана методика обеспечения информационной безопасности на предприятии, для последующего увеличения уровня защищенности конфиденциальной информации. В ходе работы производиться анализ структуры защищаемых данных и способы их передачи. Определяются возможные способы нарушения конфиденциальности, целостности и доступности информации. Составляется перечень рекомендаций, требований и мер по обеспечению защиты информации, направленные на увеличение эффективности системы защиты информации в организации.
Ключевые слова
Информационная безопасность, анализ данных, система защиты информации, требования и меры, конфиденциальность, целостность доступность.

Вопросу информационной безопасности, в современном обществе, уделяется все больше внимания. Это не удивительно, ведь успешность и эффективность любой организации напрямую зависит от уровня информационной безопасности. Сохранение конфиденциальности интеллектуальной собственности, представляющей интерес для потенциальных злоумышленников, является одной из ключевых задач, для стабильного развития любого бизнеса. В рамках работы разработана методика обеспечения информационной безопасности на предприятии «ЭКО ПАРК», целью которой является повышение эффективности систем защиты информации и снижение вероятности несанкционированного доступа к системе защиты информации на предприятии.

В рамках работы предлагается решение следующих задач:

- определение состава, способов передачи и хранения защищаемой информации;
- анализ информационной безопасности предприятия и определение перечня необходимой нормативно-правовой документации;
- определение актуальности угроз информационной безопасности и разработка модели угроз;

- формирование требований к системе защиты информации и составление перечня мер по защите информации.

Методика разделена на этапы. Выполнение каждого этапа дает результат, который используется для последующего проектирования системы защиты информации. Результаты выполненных этапов и осуществление рекомендуемых мероприятий, позволят обеспечить оптимальный комплекс мер по защите информации на предприятии ООО «ЭКОПАРК».

Методика включает в себя восемь этапов:

Этап 1 –Сбор данных об объекте защиты информации.

Этап 2 –Анализ информационных ресурсов.

Этап 3 –Анализ информационных потоков.

Этап 4 –Анализ нормативно-правовой базы.

Этап 5 –Анализ информационной безопасности предприятия.

Этап 6 –Оценка актуальности угроз информационной безопасности.

Этап 7 –Формирование требований к системе защиты информации.

Этап 8 –Выбор мер по защите информации.

Изучив организационную и нормативно-методическую документацию общества «ЭКО ПАРК», выделим основную необходимую информацию. Предприятие выполняет переработку вторичного материала, древесных отходов и полиэтилена. Деятельность организации не подлежит лицензированию. В структуре ООО «ЭКО ПАРК» можно выделить пять подразделений, в каждом из которых есть должностное лицо, отвечающее за деятельность своего отдела [1].

- руководство предприятием – генеральный директор;
- производство-директор по производству;
- отдел купли-продажи-директор отдела купли-продажи;
- бухгалтерия-главный бухгалтер;
- системный администратор.

Далее производится анализ и изучение местоположения здания, расположение помещений в которых осуществляется деятельность общества. Фиксируются и основные параметры, свойства, и технические характеристики средств обеспечения безопасности, контроля доступа, программно-аппаратной среды и т.д.

Произведя анализ информационных ресурсы ООО «ЭКО ПАРК» можем определить, что они представлены в виде электронных и бумажных баз данных, архивов, библиотек, и распределены по отделам.

- информация о банковской деятельности организации, оплаченным счетам, выставленным счетам и банковским гарантиям содержится в бухгалтерии;
- информация о покупателях, поставщиках, заключенных договорах и заявках на поставку содержится в отделе купли-продажи;
- персональные данные сотрудников хранятся в базе данных бухгалтерии, архиве;
- информация деловых взаимоотношениях с контрагентами хранится в базе данных отдела купли-продажи.

Вся информация, передающаяся между структурными подразделениями предприятия и за его пределы, образует информационные потоки. Информационные потоки предприятия ООО «ЭКО ПАРК» можно разделить на внутренние и внешние. Внутренние информационные потоки, представляют собой, омбен информацией между подразделениями внутри организации по закрытым каналам. Внешние информационные потоки, шире чем внутреенние. Большинство информации передается и принимется по открытм внешним каналам. Составлены схемы передачи инфомрмации на предприятии, для последующего определения требований по защити информации. Нормативно правовая документация обозначает требования к системе

защиты информации и сертифицированным средствам защиты информации, с учетом состава защищаемых данных. На основе структурного состава и классификации обрабатываемой информации в организации «ЭКО ПАРК» выелим основной перечень документации, требования которой необзодимо соблюдать при дальнейшей разрабоке методики обеспечения информационной безопасности, а также последующим проектированием системы защиты информации на предприятии.

1. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 152-ФЗ «О персональных данных».
2. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации».
3. Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 N 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».
4. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. N 21 «Об утверждении Состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».

Организационная документация по обеспечению информационной безопасности на предприятии ООО «ЭКО ПАРК» должна иметь иерархическую структуру, изображенную на рис. 1, состоящую из четырех уровней.

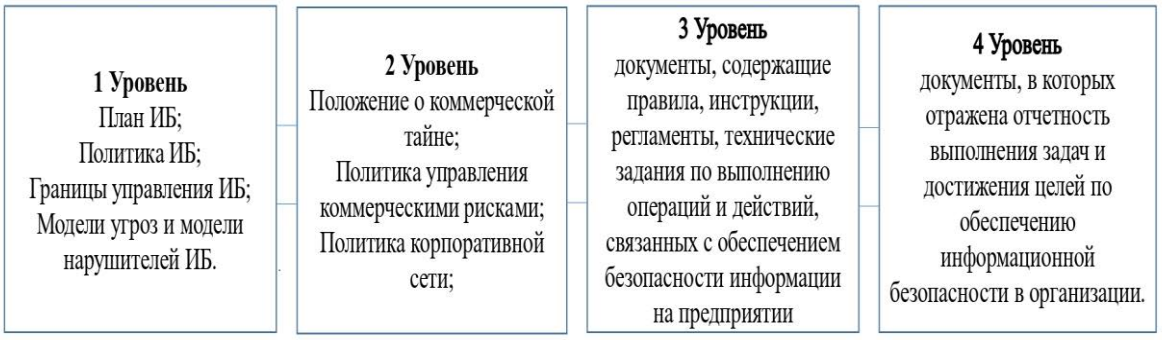


Рис. 1. Организационные документы

В первую очередь необходимо определить исходный уровень защищенности персональных данных на предприятии «ЭКО ПАРК», рис. 1 [2].

Свойства ИСПДн	Степень защищенности		
	Низкий	Средний	Высокий
Территориально ИСПДН расположен в пределах бизнес-центра и является локальной	-	+	-
К сетям общего пользования ИСПДн подключен одноточечным выходом	-	+	-
Встроенные операции с записями включают в себя модификацию и пересадку	+	-	-
Доступ лиц допущенных к ПД ограничивается перечнем допущенных сотрудников	-	+	-
ИСПДн не соединено с другими базами ПДи и ИСПДН	-	-	+
Существует информация позволяющая определить принадлежность ПД к конкретному субъекту	+	-	-
Сторонним пользователям предоставляется вся база данных с ПДн необработанной	+	-	-

Рис. 2. Исходная защищенность

На рис. 2 показан способ вычисления уровня исходной защищенности, необходимый для дальнейшего определения требований к информационной системе персональных данных. Он будет представлен в виде обобщенного показателя Y1, зависящего от технических и эксплуатационных характеристик информационной системы персональных данных. Осуществив все необходимые мероприятия и вычисления определим, уровень исходной защищенности предприятия как низкий, параметру Y1 соответствует число десять. Когда уровень исходной защищенности определен, необходимо произвести оценку веротяности реилазции угроз информационной безопасности. Ей присваивается коэффициент Y2. Он используется для выполнения комплексной оценки возможностей реализации угроз Y в процессе составления модели угроз информационной безопасности. Y2 вычисляется для отдельно для каждой угрозы. Параметру Y соответствует реализуемость угроз инорформационной безопасности и выисляется на основе резульатов определения уровня ихсодной защищенности информационной системы персональных данных Y1 и вероятности реализации возможных угроз Y2. На первых этапах методики была изучена и проанализирована структура предприятия, схема информационных потоков. Были выявлены субъекты участвующие в обработки конфиденциальных данных. На основе проведенных исследований уровень исходной защищенности был определён как низкий. После оценки вероятности реализации угроз и возможности их реализации необходимо составить модель угроз информационной безопасности, для этого используем следующий метод, изображенный на рис. 3.

Возможность реализации угроз ИБ	Показатель опасности угрозы ИБ		
	Низкая	Средняя	Высокая
Низкая	неактуальная	неактуальная	актуальная
Средняя	неактуальная	актуальная	актуальная
Высокая	актуальная	актуальная	актуальная
Очень высокая	актуальная	актуальная	актуальная

Рис. 3. Метод определения актуальности угроз

Составив модель угроз информационной безопасности предприятия «ЭКО ПАРК», можем сделать вывод о том, что большинство угроз информационной безопасности являются актуальными, а вероятность и возможность их реализации находятся на высоком и очень высоком уровнях [3]. Эти показатели уменьшаться, при формировании системы защиты информации, с использованием специальных мер по обеспечению необходимого уровня безопасности. Для информационной системы предприятия ООО «ЭКО ПАРК» актуальны угрозы третьего уровня. Обрабатываемые в информационной системе персональных данных о категории персональных данных сотрудников оператора, а также иные категории персональных данных, не являющихся сотрудниками оператора, насчитывает менее ста тысяч субъектов персональных данных. С учетом этих факторов необходимо обеспечить 4-й уровень защищенности персональных данных, при обработке в информационной системе персональных данных. Сформированные требования к системе защиты информации представляют из себя список требований безопасности, которые необходимо выполнить, для обеспечения 4-го уровня защищенности персональных данных. Список требований безопасности, которые необходимо реализовать определен в Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 N 1119, и выглядит следующим образом [4].

- режим обеспечения безопасности помещений, в которых находится информационная система, должен исключать возможность неправомерного проникновения или нахождение в нем лиц, не имеющих доступа в данное помещение;
- необходимо обеспечить сохранность всех носителей персональных данных;
- для выполнения сотрудниками своих служебных обязанностей, руководителем должен быть утвержден перечень лиц, которым разрешена работы с персональными данными, обрабатываемыми в информационной системе персональных данных;
- средства защиты информации, используемые для работы с персональными данными, должны соответствовать требованиям законодательства РФ в области обеспечения информационной безопасности, если данные средства направлены на нейтрализацию актуальных угроз.

Выбор организационных и технических мер по защите информации на предприятии ООО «ЭКО ПАРК», должен осуществляться с учетом выполнения максимального количества требования к защищенности системы, для этого необходимо учесть, при выборе средств защиты информации, их совместимость с основными средствами защиты информации, используемыми в информационной системе персональных данных [5]. На данном этапе определяется состав мер по защите информации. При выполнение рекомендуемых мер по обеспечению информационной безопасности, возможность и вероятность реализации угроз, на нейтрализацию которых они направлены, снизится и как следствие уменьшится количество актуальных угроз, следовательно, эффективность системы защиты информации на предприятии повысится.

1) аутентификация и идентификация субъектов доступа и объектов доступа;
2) управление доступом субъектов доступа и объектов доступа;
3) аудит безопасности;
4) обеспечение антивирусной защиты;
5) контроль защищенности персональных данных;
6) защита среды виртуализации;
7) защита технических средств;
8) защита информационной системы, ее средств, систем связи и передачи данных;
9) обеспечение действий в нештатных ситуациях;
10) обучение и информирование персонала.

Была разработана методика обеспечения информационной безопасности предприятия общество с ограниченной ответственностью «ЭКО ПАРК». Все задачи, выполнение которых было необходимо решены. При проектировании комплексной системы защиты информации на предприятии ООО «ЭКО ПАРК» и в организациях подобного типа, использование разработанной методики обеспечит:

- повышение эффективности системы защиты информации;
- уменьшение (исключение) ошибок проектирования систем обеспечения информационной безопасности уже на ранних этапах;
- сокращение трудозатрат при планировании мероприятий защиты информации и проектировании систем обеспечения информационной безопасности;
- возможность разработки эталонной методики для последующей подготовки специалистов в области информационной безопасности;

Литература

1. Ружанская Л.С., Яшин А.А., Солдатова Ю.В., «Теория организации»: учебное пособие., М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский

федеральный университет. Екатеринбург. Издательство Уральского университета. 2016. 198 с.
2. Нормативно-методический документ «Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных», утвержденный заместителем директора ФСТЭК России 14 февраля 2008 г.
3. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных // Утверждена Заместителем директора ФСТЭК России, 15 февраля 2008г.
4. Постановление Правительства РФ от 01.11.2012 N 1119 «Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».
5. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. N 21 «Об утверждении Состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных».

Бородина Любовь Николаевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы №V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Физика наноструктур,
e-mail: lborodina98@mail.ru
Вениаминов Андрей Викторович
Год рождения: 1960
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
д.ф-м.н. с.н.с,
e-mail: avveniaminov@itmo.ru

УДК 53.086; 778.38

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ BAYFOL HX

Л.Н. Бородина
Научный руководитель – д.ф.-м.н., с.н.с. А.В. Вениаминов

Работа выполнена в рамках темы НИР №12444 «Люминесцирующие нанокомпозиты с квантовыми точками для терапии и диагностики».

Аннотация
В настоящей работе представлены результаты исследования локальных изменений люминесценции фотополимерного светочувствительного материала для голографии Bayfol HX с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM 710. В работе рассмотрены фотоиндуцированные изменения в спектрах и пространственном распределении люминесценции фотополимеризующегося материала Bayfol HX для оценки молекулярной подвижности красителей и проверки выполнения фотохимического закона взаимозаместимости.
Ключевые слова
Фотополимер, голография, люминесценция, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, диффузия, взаимозаместимость.

Введение

Фотополимерный нанокомпозитный материал Bayfol HX [1] в настоящее время является лучшим коммерческим материалом для голографии. Он широко используется в качестве регистрирующей среды для записи как изобразительных голограмм, так и голограммных оптических элементов. Актуальным направлением использования фотополимерного материала является создание устройств дополненной реальности. Именно поэтому фотополимер Bayfol HX стал объектом многочисленных исследований с использованием голографических подходов. Дополнить их может применение лазерного сканирующего микроскопа, способного обеспечить как экспонирование микроскопических участков пленки, так и измерение их спектральных параметров.

Фотополимерная среда

Нанокомпозитный полимерный светочувствительный материал Bayfol HX включает в себя светочувствительный слой толщиной 16 мкм, который расположен

между подложкой из триацетата целлюлозы толщиной 36 мкм и прозрачной полиэтиленовой защитной пленкой толщиной 40 мкм, которая была удалена перед закреплением материала на предметном стекле [1].

На рис. 1 представлен спектр поглощения пленки Bayfol HX. Используемые в материале инициаторы поглощают свет в широком спектральном диапазоне от 440 нм до 660 нм, что позволяет использовать для голографической записи источники излучения практически всего видимого диапазона.

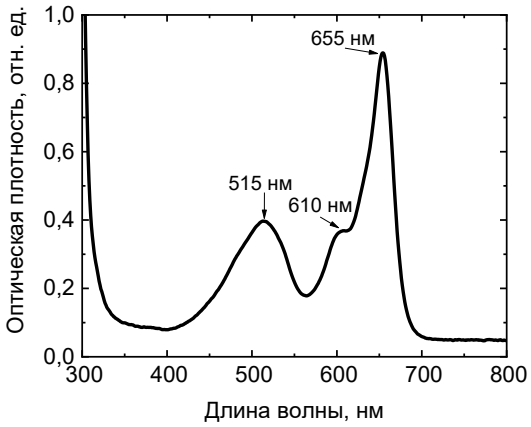


Рис. 1. Спектр поглощения фотополимерного материала Bayfol HX

Конфокальная микроскопия как метод исследования материалов для голографии

Использование лазерного сканирующего микроскопа позволяет не только строить объёмные изображения, но и избирательно воздействовать на объект, отслеживать динамику локальных изменений интенсивности и спектров люминесценции, что позволяет судить о фотоиндуцированных процессах в среде. В настоящей работе для исследования был использован микроскоп LSM 710 (Zeiss).

С помощью лазерного сканирующего микроскопа можно создавать дифракционные структуры, подобные голографическим. Примером является решётка, записанная сканирующим лазерным лучом в фотополимерной среде Bayfol HX, которая представлена на рис. 2 вместе с картиной дифракции белого света на ней, включающей -2, -1, 0, 1 и 2-й порядки дифракции.

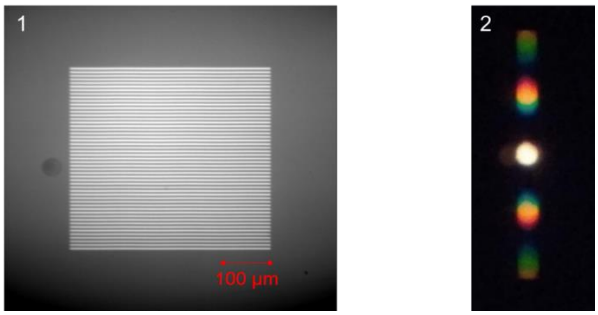


Рис. 2. Фазовая решетка, записанная в фотополимере Bayfol HX сканирующим лазерным лучом микроскопа (1), и наблюдаемая на ней дифракция белого света (2)

Но гораздо важнее использование конфокального микроскопа для исследования локальных изменений среды, возникающих в результате фотополимеризации.

При экспонировании участка пленки лазерным излучением с длиной волны 488 нм наблюдалось просветление в канале проходящего света и увеличение

интенсивности, а также изменение спектров люминесценции. Данные изменения связанны с фотохимическими преобразованиями сенсибилизаторов. Соответствующие снимки, полученные в разных режимах работы микроскопа, представлены на рис. 3. На снимке, полученном методом дифференциально-интерференционного контраста (ДИК), показаны фазовые изменения, возникающие в процессе фотополимеризации.

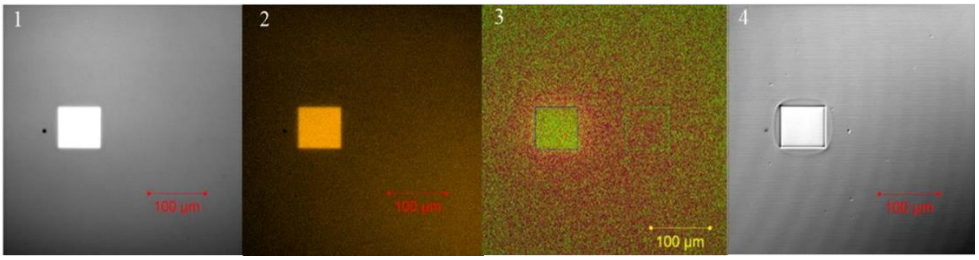


Рис. 3. Снимки участка пленки после экспонирования квадрата 80x80 мкм лазерным излучением с длиной волны 488 нм, используемые для исследования изменения: 1-пропускания; 2-интенсивности люминесценции, 3-спектра люминесценции, 4-фазового сдвига (ДИК)

Люминесценция фотополимерного материала Bayfol HX

Анализ изменений спектров люминесценции красителей в процессе фотополимеризации важен для понимания того, каким образом проходят фотоиндуцированные изменения в среде.

При экспонировании светочувствительного материала излучением с длиной волны 488 нм наблюдались значительные изменения спектра люминесценции красителей. Серия снимков, полученных в данном эксперименте, показана на рис. 4, а соответствующее изменение спектров люминесценции на рис. 5.

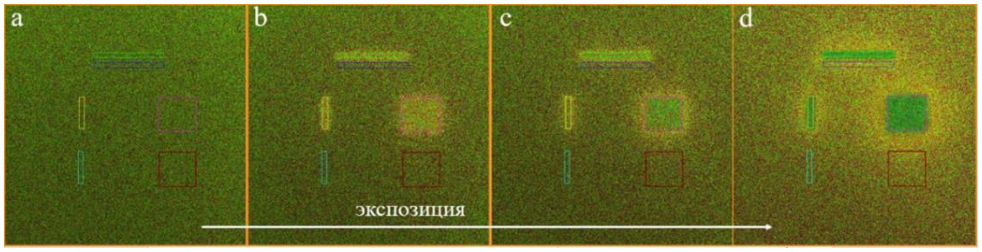


Рис. 4. Изменение интенсивности и спектра люминесценции в ходе экспонирования участков пленки Bayfol HX светом 488 нм

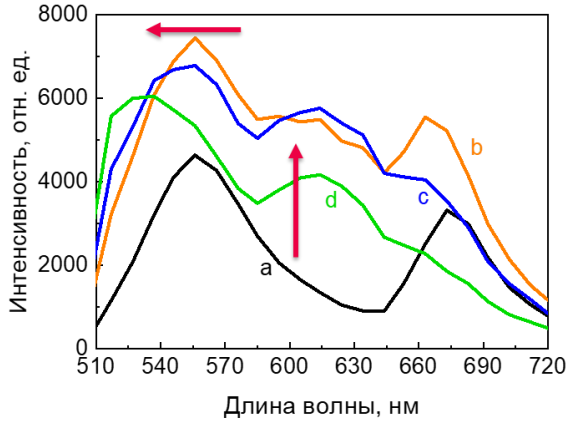


Рис. 5. Изменение спектров люминнесценции засвеченной области

При увеличении экспозиции спектр люминесценции красителей значительно изменялся. В начальный момент времени интенсивность люминесценции увеличивалась и появлялась полоса с максимумом на длине волны 620 нм, относящаяся к фотопродукту. По мере увеличения экспозиции длинноволновая полоса на 670 нм исчезала, а коротковолновая (555 нм) сдвигалась, при этом центральный максимум на длине волны 620 нм не изменял своего положения. Данные изменения спектров люминесценции связаны с фотохимическим преобразованием сенсибилизаторов фотополимеризации.

Особенности изменения спектров люминесценции фотополимера указывают на то, что в исследуемой системе присутствуют несколько красителей, при этом люминесцируют как исходные красители-сенсибилизаторы, так и продукты их фотопревращений.

Даже небольшого остаточного поглощения почти полностью прозрачного слоя достаточно для возбуждения люминесценции, по интенсивности превосходящей люминесценцию неэкспонированного материала. Такая люминесценция в голограмме является нежелательным явлением, и может влиять на оценку дифракционной эффективности, но анализ её локальных изменений может быть использован для диагностики: по изменению спектра можно судить о фототрансформациях красителей.

Нарушение взаимозаместимости, диффузия кислорода

При исследовании люминесценции фотополимерной пленки Bayfol HX с помощью конфокального микроскопа было обнаружено нарушение закона взаимозаместимости.

Фотографическая или фотохимическая взаимозаместимость по закону Бунзена-Роско означает, что эффект от воздействия света определяется поглощенной энергией, а не отдельно длительностью или мощностью экспонирования.

Отклонение от взаимозаместимости при голографической записи в фотополимерах связывают с ингибирующим действием кислорода на полимеризацию.

На рис. 5 представлены изменения спектров люминесценции фотополимера при разной длительности экспонирования. При одинаковой энергетической экспозиции длительная засветка вызывает более значительные изменения спектров люминесценции, чем быстрая.

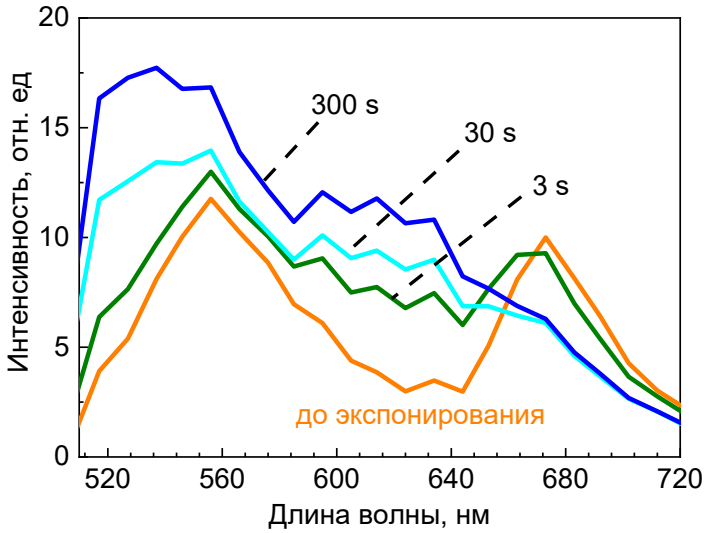


Рис. 6. Спектры люминесценции материала до и после экспонирования светом 488 нм в течение 3, 30, 300 с при одинаковой общей энергии падающего света

Невзаимозаместимость в отношении фототрансформации красителей, проявляющейся в изменении спектров их люминесценции, также естественно связывать с действием кислорода, проникающего через покровную пленку к светочувствительному слою.

Используя полученные результаты, можно оценить коэффициент диффузии кислорода по характерному времени экспонирования (порядка 100 с) и толщине слоя (36 мкм) как $D \approx 10^{-8} см^2 с^{-1}$, что характерно для диффузии кислорода в полимерах [2].

Оценка коэффициента диффузии красителей

На снимках засвеченных областей, представленных ранее на рис. 4, проявляются краевые эффекты, которые указывают на подвижность красителей в светочувствительном материале. Важной задачей являлась оценка их коэффициента диффузии.

Подход, используемый для исследования диффузии, близок к известному методу изучения молекулярной подвижности, основанному на восстановлении люминесценции после фотообесцвечивания (FRAP – Fluorescence Recovery After Photobleaching), но отличающемуся от него тем, что в данном случае анализируется не интегральное изменение интенсивности, а распределение интенсивности люминесценции инициаторов полимеризации.

В данном случае проводилось исследование изменений распределения интенсивности люминесценции красителей после экспонирования сканирующим лазерным пучком полосы шириной 5 мкм, которое привело к возрастанию интенсивности люминесценции. Серия снимков, полученных в данном опыте, представлена на рис. 7.

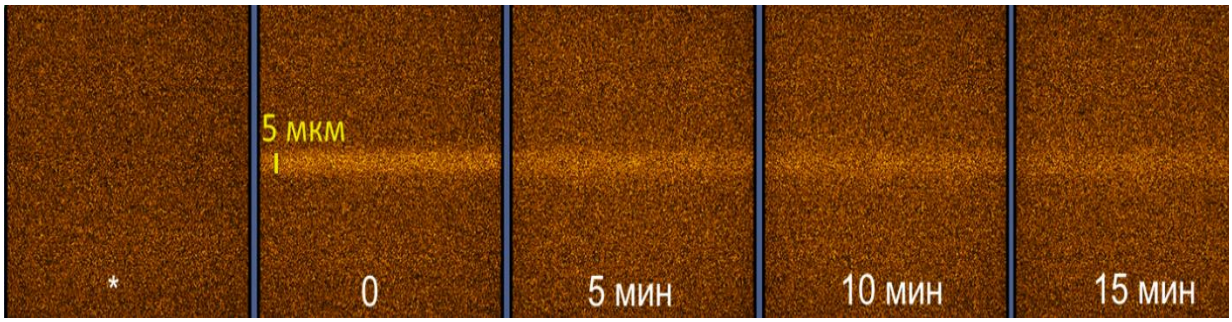


Рис. 7. Изменение пространственного распределения интенсивности
люминесценции красителей после фотообесцвечивания полосы шириной 5 мкм.
Снимки: * – перед экспонированием; 0 – сразу после экспонирования; через 5, 10, 15 минут

Исходя из решения уравнения диффузии, ожидалось, что распределение концентрации красителей, следовательно, и интенсивности люминесценции, приобретёт гауссову форму и будет расширяться с течением времени. Для анализа полученных данных поперечные профили интенсивности люминесценции усреднялись вдоль полосы и аппроксимировались функцией Гаусса. На рис. 8 представлено изменение профиля засвеченной области с течением времени и результат аппроксимации полученных профилей.

Для нахождения коэффициента диффузии красителей использовалась полученная зависимость квадрата полуширины профиля от времени. Данная зависимость аппроксимировалась линейной функцией. Результат представлен на рис. 9.

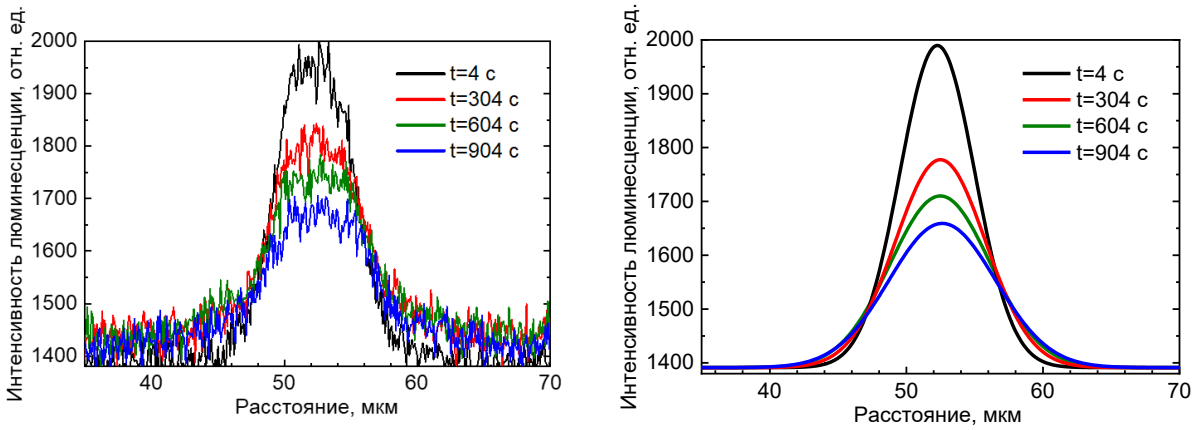


Рис. 8. Изменение поперечного профиля интенсивности люминесценции в засвеченной области с течением времени (слева) и результат гауссовой аппроксимации полученных профилей (справа)

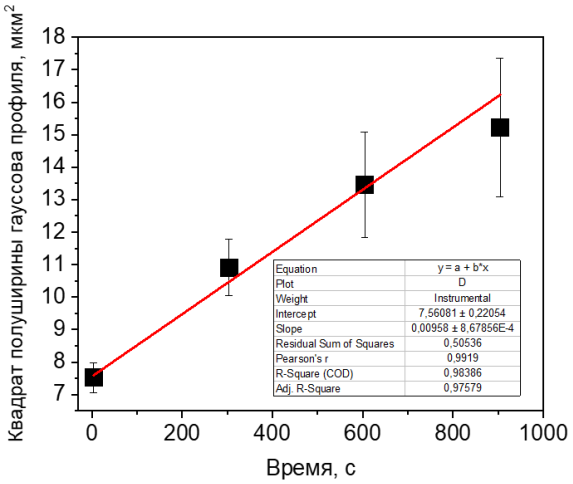


Рис. 9. Зависимость квадрата полуширины гауссова профиля от времени

По наклону полученной зависимости был определён коэффициент диффузии красителей $D = (5{,}0 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-11} см^2 с^{-1}$, который находится между значениями, характерными для сильно пластифицированных и жёстких непластифицированных полимеров [3].

Заключение

По результатам проведённого исследования оптических и диффузионных свойств нанокомпозитного полимерного светочувствительного материала для голографии Bayfol HX были сделаны следующие выводы:

Фотообесцвечивание при экспонировании светочувствительного материала не приводит к исчезновению люминесценции компонент среды, которая влияет на свойства записанных в ней голограмм, но она же может быть применена для изучения как фототрансформаций, так и молекулярной подвижности.

Обнаружено нарушение фотохимического закона взаимозаместимости в отношении люминесценции красителей-сенсибилизаторов в составе пленки с характерным временем 100 с, которое соответствует коэффициенту диффузии кислорода через покровную плёнку $D \approx 10^{-8} см^2 с^{-1}$.

На основе изменений пространственного распределения интенсивности люминесценции проведена оценка коэффициента диффузии красителей в фотополимерном материале: $D = (5,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-11} см^2 с^{-1}$.

Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия является новым методом исследования светочувствительных материалов, хорошо дополняющим голографические методы.

Литература

1. Bruder F.K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer // Polymers. 2017. V. 9. № 10. P. 472.
2. Vyazovkin V.L., Korolev V.V., Syutkin V.M., Tolkatchev V.A. On oxygen diffusion in poly (methyl methacrylate) films // Reaction Kinetics and Catalysis Letters. 2002. V. 77. № 2. P. 293-299.
3. Лашков Г.И., Вениаминов А.В., Ратнер О.Б. Исследование диффузии соединений антраценовой структуры в полиметилметакрилате методом голографической релаксометрии // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 1986. Т.28. №2. С.435-439.

Васильев Иван Андреевич
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы №V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Физика наноструктур,
e-mail: vas.iwan2010@gmail.com
Рождественский Юрий Владимирович
Год рождения: 1958
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
д.ф-м.н. профессор,
e-mail: rozd-yu@mail.ru

УДК 53.06

ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

И.А. Васильев
Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Ю.В. Рождественский

Аннотация
В данной работе рассмотрены основные критерии к физической реализации квантовых компьютеров. Основной характеристикой большинства квантовых компьютеров является время декогеренции, за которое необходимо успеть выполнить большое количество операций. Также в работе рассмотрены основные способы реализации квантовых компьютеров и проблемы, которые мешают построению эффективных квантовых вычислений.
Ключевые слова
Квантовый компьютер, квантовые вычисления, декогеренция, масштабируемость.

Введение

В 1980 г. Юрием Маниным была предложена идея о квантовых вычислениях. Позднее в 1981 г. Ричард Фейнман предложил одну из первых моделей квинтового компьютера [1]. Вскоре после этого Пол Бениофф описал теоретические основы квантового компьютера [2]. Также концепцию такого компьютера предлагал Стивен Визнер в 1983 г [3].

За последние несколько десятилетий в области квантовой теории информации был достигнут значительный прогресс. На сегодняшний момент понятно, что квантовый компьютер способен обеспечить преимущество в хранении, передаче и обработке информации, закодированной в системах, которые проявляют уникальные квантовые свойства. Многие исследовательские группы по всему миру работают над достижением превосходства в создании такого компьютера, который сможет значительно повысить вычислительную мощность для реализации конкретных задач. Единственное, что на данный момент остается неясным, какие технологии в конечном итоге окажутся успешными.

Квантовый компьютер – это вычислительное устройство, работающее по принципам квантовой механики. Квантовая частица может находиться в нескольких местах и состояниях одновременно, поэтому по определению квантовая механика полностью противоречит общей теории относительности.

Данная особенность позволяет квантовым компьютерам значительно превосходить классических компьютер в решении сложных математических задач. Примером такой задачи является квантовый алгоритм Шора для факторизации больших чисел, который мотивировал ученых на создание и развитие квантовых компьютеров. Алгоритм Шора является одним из нескольких квантовых алгоритмов, который позволил бы квантовому компьютеру скромных размеров превзойти крупнейшие классические суперкомпьютеры [4]. Если говорить о долгосрочной перспективе, то другое применение может способствовать достаточно сильному технологическому прорыву. Предложение Фейнмана 1980-х годов об использовании квантовых компьютеров для эффективного моделирования квантовых систем является задачей будущего для всей сферы квантовой информации. Со временем квантовая механика будет играть все более важную роль. С помощью квантовых вычислений ученые могли бы понять и спроектировать всевозможные системы на атомном уровне.

В ходе данной работы будут рассмотрены основные способы физической реализации и ограничения, которые на данный момент преодолеть не удалось. Так же будет построена модель эффективных квантовых вычислений основанных на определенных критериях и требованиях.

Основные проблемы и требования к квантовым вычислениям

Фундаментальным и универсальным требование к созданию любого квантового компьютера является условие "замкнутого ящика". Внутренняя работа квантового компьютера должна быть изолирована от окружающей среды. Незначительные объемы утечки информации из ящика нарушают квантово-механическое взаимодействие, вызывая деструктивный процесс, иначе такой процесс носит название декогеренстность. Декогеренстность может проявляться в нескольких формах. Интерференционные явления, вызванные квантово-механическими волнами, могут исчезать в череде повторяющихся экспериментов. Это можно объяснить влиянием различных квантовых процессов на фазы волновых функций. В ансамблевом измерении подобные изменения частоты генератора приводят к затуханию волновой интерференции на временной шкале T^*_2. Квантового генератора способен сохранить фазовую когерентность в течении длительного временного промежутка только в случае единичного запуска системы. В более общем случае случайные процессы могут как добавлять, так и заимствовать энергию из осциллятора, приводя систему в состояние теплового равновесия в масштабе времени T_1. Аналогично, процессы могут только получать энергию из окружающей среды, внося изменения в фазу осциллятора, что ведет к затуханию колебаний в масштабе времени T_2. Для большинства систем $T_1 \gg T_2$. Принципиально, чтобы выполнялось условие $2T_1 \geq T_2$, из чего можно сделать вывод, что для квантовых вычислений параметр T_2 является более значимым параметром. Наглядно времена деффазификации и декогеренции продемонстрированы на рисунке.

Ни одна система не может быть полностью свободна от декогеренции. Однако влияние декогеренции можно ослабить с помощью различных метод, объединенных в процедуру "квантовой коррекции ошибок". Ошибки также можно исправить используя отказоустойчивые ресурсы, которые будут показывать вероятность ошибки ниже определенного порогового значения, который, в свою очередь, зависит от аппаратного оснащения, источников ошибки, а также используемых протоколов квантовой коррекции ошибок (англ. Quantum error correction - QEC). На практике оказывается так, что большая часть ресурсов, которые используются в отказоустойчивом квантовом компьютере, будет направлена на исправление его собственных ошибок. В ситуации, когда вычислительные ресурсы не ограничены, порог отказоустойчивости может быть снижен до 3% [6]. В подобных системах время T_2 используется в качестве основной характеристики. Все элементы квантового компьютера могут обеспечить

отказоустойчивость только в том случае, если они работают быстрее, чем время T_2. Однако существуют и другие типы ошибок. К примеру, большая система часто демонстрирует коррелированные шумовые процессы, которые значительно отличаются от декогеренции.

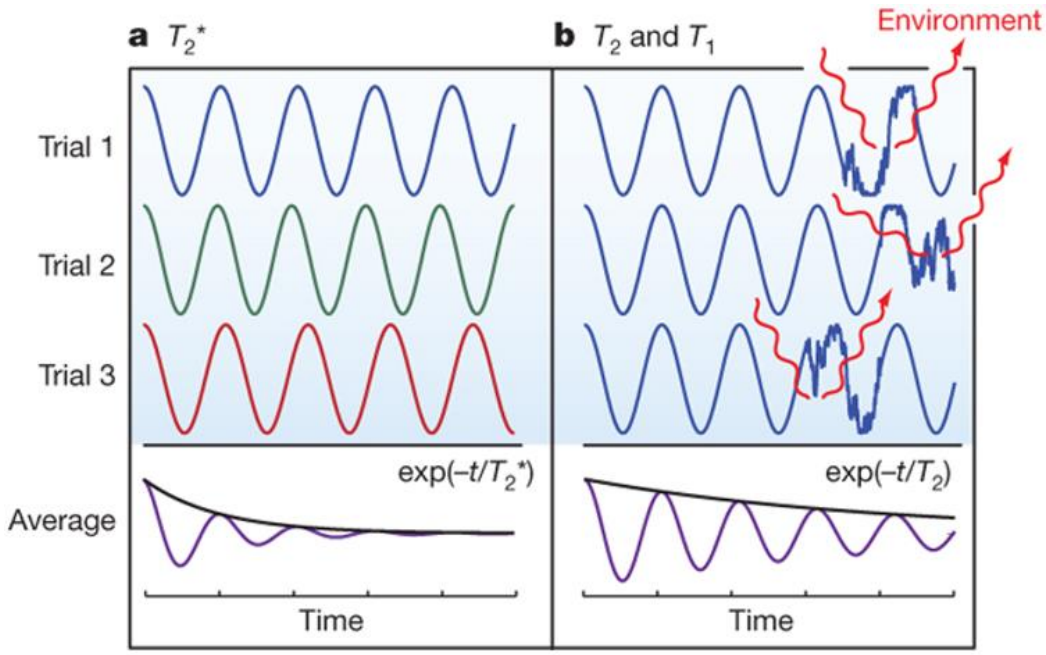


Рисунок. Деффазификация (слева) при нескольких измерениях, показанных разным цветом, в масштабе времени T^*_2 и декогеренция (справа) в масштабе времени T_2. [5]

Впервые четкие требования для физической реализации отказоустойчивого квантового компьютера представил Ди Винчензо [7]. Достаточно большое время декогеренции является одним из таких критериев. Однако остается вопрос каким должно быть время T_2, чтобы удовлетворять данному условию. Опубликование критериев Ди Винчензо повлекло за собой масштабный рост идей реализации квантовых вычислений. На данный момент критерии, которые были описаны изначально, не могут быть применимы в современных реалиях, так как был достигнут значительный прогресс в данной области. На данный момент можно обобщить три более распространенных критерия на современные реалии, если принять время декогеренции достаточно малым.

Одним из самых важных критериев является масштабируемость. Компьютер должен работать в гильбертовом пространстве, размеры которого могут расти без экспоненциальных затрат ресурсов. К примеру время, пространство и энергия. Основным способом достижения масштабируемости является добавление хорошо охарактеризованных кубитов. Очевидным вариантов такого кубита является объект со спином-1/2. Так как кубит в суперпозиции двух квантовых состояний является квантовым осциллятором, можно утверждать, что присутствуют продольные (T_1) и поперечные (T_2) релаксации. Выше было описано какое количество информации может предоставлять система кубитов. Соответственно, из этого можно сделать вывод, что именно гильбертово пространство достаточно больших размеров является основным преимуществом квантовых компьютеров, которые способны выполнять операции, недоступные для классических компьютеров. Несмотря на то, что данный способ является основным. Стоит также отметить существование различных ресурсов управления и определения кубитов. Примером таких ресурсов являются специальные

лазеры, охлаждающие элементы и многое другое. Классические элементы данной системы также должны быть масштабируемыми, что влечет за собой массу проблем, а именно размеры данных технологий [5].

Логично предположить, что для создания подобного гильбертового пространства необходимо иметь определенные инструменты. Поэтому вторым немаловажным критерием является конечный набор управляющих ресурсов, с помощью которых достижимо гильбертово пространство такого рода. При этом набор ресурсов должен соответствовать условию масштабируемости и не должен расти экспоненциально. Для выполнения данного критерия в стандартном случае требуется наличие универсального набора логических элементов. Данный критерий принято называть универсальной логикой. В случае кубитов будет достаточно одного однокубитового элемента, к примеру, осуществляющего вращение кубита, и одного двухкубитного элемента, который обеспечивает запутанную логическую операцию. Примером такого двухкубитного элемента является "контролируемое НЕ" или "controlled-NOT" (CNOT). Данный квантовый вентиль аналогичен логическому элементу XOR. Представить его можно в виде $|A,B\rangle \rightarrow |A,B\oplus A\rangle$, где $\oplus$ является сложением по модулю 2. На сегодняшний день стало понятно, что компьютер не обязательно должен быть оснащен квантовыми выходами. К примеру, в случае адиабатических или кластерных квантовых вычислений не требуется какой-либо набор логических вентилей [8]. Данные вычисления по мощности эквивалентны вентильным, однако их реализации в некоторых конкретных случаях может быть в разы проще.

Следующий критерий объединяет в себе сразу два критерия Ди Винчензо. Для поддержания необходимого квантового состояния необходимо уметь извлекать энтропию компьютера. Любой протокол квантовой коррекции ошибок требует как эффективной инициализации, что отражает второй критерий Ди Винчинзо, так и измерения, что составляет пятый критерий вышеупомянутого. Данный критерий называют коррективностью. Это необходимо для устранения нежелательной энтропии, которое попадает в систему из внешнего мира. Процесс инициализации в первую очередь относится к понижению энтропии системы, что напрямую возможно при охлаждении. Процесс измерения в основном связан с скоростью определения состояния квантовой системы с определенной точностью. Существуют ситуации, в которых эти критерии совпадают. Например, существует квантовое неразрушающее измерение (англ. quantum non-demolition - QND) способное изменять состояние путем проецирования в уже измеренное состояние, которое, в свою очередь, остается неизменным в любой ситуации. Соответственно QND также инициализирует квантовую систему. Связь между данными параметрами является сложной и не до конца понятной. В конечном счете всегда требуется какая-то форма измерения, чтобы прочитать состояние в конце, и некоторое количество физической инициализации в начале, но точное количество остается неизвестным. Схемы подобных систем были представлены в [9].

Квантовые вычисления являются невероятно трудными и влекут за собой множество проблем. К тому же критерии описанные выше зачастую противоречат друг другу. Части системы, в которых достигается достаточно высокая скорость измерений, сильно "включены" с целью исправления ошибок, а с другой стороны они должны быть сильно "выключены" с целью устранения декогерентности в большом гильбертовом пространстве. В общем случае реализовать состояния "Включено" и "Выключены" не являются сложными в реализации. Совершенно другая ситуация возникает с переключениями между данными состояниями. Чаще всего данные разногласия устраняют еще на стадии проектирования масштабируемой архитектуры при помощи методов квантовой связи. Специально для этого Ди Винчензо определил дополнительные требования, которые связаны с возможностью преобразования в

"летающие кубиты" стационарных кубитов. Очевидным примером летающих кубитов являются фотоны [5].

Основные способы физической реализации квантовых компьютеров

На сегодняшний день лучшие стандарты времени и частоты достигаются при использовании изолированных атомных систем. Достигается это благодаря когерентным свойствам энергетических уровней внутри атомов. Захваченные в ионную ловушку атомах образуют очень надежные кубиты, которые демонстрируют времена T_1 и T_2 больше одной секунды. Запутывание квантовых элементов происходит за счет соответствующих взаимодействий между атомами, а инициализация – за счет оптической накачкой. Измерение осуществляется с помощью оптического флуоресцентного детектирования, которое напрямую зависит от состояния, и дает практически 100% эффективность.

В 2008 году ученым удалось продемонстрировать, что отдельные атомарные ионы можно размещать в свободное пространство с нанометровой точностью. Некоторое количество ионных кубитов можно запутать используя спиновую связь, индуцированную лазером, которая возникает за счет коллективного режима гармонического движения в ловушке. Простейшую реализацию подобного взаимодействия была предложена и продемонстрирована еще в 1995 году. За годы исследований система значительно эволюционировала. В настоящий момент данный подход опирается на спин-зависимые силы, которые не требуют оптическую адресацию для каждого отдельного иона, а также отсутствует какая-либо подготовка ионного движения в чистое квантовое состояние. На данный момент восемь ионных кубитов запутанных указанным выше способом могут составлять единую цепочку [10].

Так же стоит обратить внимание на тот факт, что нейтрально заряженные атомы могут рассматриваться в качестве кубитов, аналогично ионам. Если ограничить объединение нейтрально заряженных атомов в некотором свободном пространстве при помощи скрещенных лазерных лучей, можно получить некоторую решетчатую структуру. Лазеры в данном случае располагаются на достаточно большом расстоянии от места атомного резонанса, что дает возможность получать эффективный потенциал для локализации атомов. В случае подобных оптических решеток управлять размерностью, формой, глубиной и их положением возможно при помощи геометрии, поля ризации или интенсивности лазерных пучков, определяющих саму решетку. Однако существует ряд проблем связанных с недостатком контролируемой инициализации, а также с измерением атомарных кубитов. Данные проблемы частично научились решать за последнее десятилетие. Один из существующих подходов заключается в наблюдение за атомами в момент перехода в состояния Ридберга. При переходе атомы обладают достаточно большим дипольным моментом. Использование механизма "дипольной блокады" предотвращает переход нескольких атомов в состояния Ридберга [11].

Время декогеренции локализованных атомов и ионов значительно превышает времена всех возможных на данный момент реализаций квантового компьютера. Однако очевидные проблемы управления, инициализации или измерения кубитов до сих пор значительно тормозят развитие в данной области. Так же очевидной проблемой является масштабирование, при котором лазерное охлаждение перестает быть актуальным.

Сложность квантовых вычислений, описанных выше, заключается в необходимости непрерывного охлаждения и локализации. Логично предположить, что большое количество кубитов проще в управлении или охлаждении, если атомы интегрированы в твердотельную подложку. Данный аспект приводит к использованию квантовых точек или легирующих веществ в твердых телах.

Используемые квантовые точки чаще всего бывают двух видов: электростатически определенные (легированные) и самоорганизующиеся квантовые точки. Первые возможно контролировать при помощи определенных контролируемых напряжений. Вторые сами создают потенциал в процессе случайного роста полупроводника. Основным отличием между данными структурами является глубина создаваемого потенциала. Это приводит к тому, что электростатически определенные квантовые точки работают при температурах приближенных к 1 K и управляются с помощью электрических полей, а самоорганизующиеся работают при более высоких температурах порядка 4 K и по большей части управляются оптически.

Главной проблемой использования электростатически определенных квантовых точек остается достаточно короткое время обменного взаимодействия, что накладывает определенные ограничения при создании отказоустойчивого квантового компьютера, а также при реализации протоколов QEC. В данной ситуации логично предположить, что помочь могут фотонные связи, как это было показано в случае локализованных ионов и атомов. Самоорганизующиеся квантовые точки обладают достаточной фотонной связью ввиду большого размера по сравнению с одиночными атомами [5, 12]

Перейдем к рассмотрению оптически активных легирующих веществ, которые также обладают фотонными связями, но однородность у данных структур выше, чем квантовых точек. Самым распространенным примером подобных структур являются отрицательно заряженные NV-цетры в алмазе. Часто данную технику реализации квантовых компьютером относят к твердотельному ядерно-магнитному резонансу, что объяснимо наличием ядерных спинов в приведенных ниже структурах. Такой алмаз состоит из замещающего азота в некоторых узлах решетки, а также соседствующих с ними атомов углерода. Отрицательное состояние NV-центра образует триплетную спиновую систему. Под воздействием оптического освещения спин-селективные релаксации способствуют оптической накачке системы в одно спиновое состояние. Данный факт способствует быстрой инициализации спинового кубита (250 нс). Также спиновым состоянием можно манипулировать при помощи микроволновых резонансных полей, что позволяет достаточно быстро зафиксировать данное состояние при помощи флуоресценции в оптическом микроскопе.

Несмотря на все преимущества данного метода, проблема масштабирования подобных систем остается актуальной. Положительной стороной в данном случае является достаточно большая разница между временем декогеренции и временем управления (1 - 100 пс), инициализации и измерения (1 - 10 нс). Однако для масштабирования данных систем необходимо корреляция нескольких методов, что и приводит к уменьшению времени декогеренции и увеличению времени управления.

Заключение

Квантовые компьютеры и квантовые вычисления – очень многообещающая, очень молодая и пока малоприменимая в промышленном плане область информационных технологий. В данный момент кванновые вычисления находятся на стадии исследований и разработки. Основные проблемы при создании и эксплуатации квантовых компьютеров: масштабируемость, декогеренция, отсутствие универсальной логики, коррективность. Очень сильное влияние на физические системы оказывает время декогеренции, за которые необходимо реализовать все необходимые операции от инициализации до измерения.

Также стоит помнить, что на данный момент невозможно создание дешевого и доступного квантового компьютера ввиду дорогих аппаратных средств. Помочь в решении данной проблемы может какое-нибудь значимое физическое открытие, которое либо снизит затраты на реализацию и эксплуатацию, либо позволит на порядок увеличить время декогеренции и снизить число ошибок.

Литература

1. Feynman Richard P. Simulating physics with computers // Int. J. Theor. Phys. 1999. Vol. 21. no. 6/7.
2. Benio_ Paul. Quantum mechanical Hamiltonian models of Turing machines // Journal of Statistical Physics. 1982. Vol. 29. no. 3. P. 515-546.
3. Wiesner Stephen. Conjugate coding // ACM Sigact News. 1983. Vol. 15. no. 1. P. 78-88.
4. Shor Peter W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science / Ieee. 1994. P. 124-134.
5. Quantum computers / Thaddeus D Ladd, Fedor Jelezko, Raymond Laflamme et al. // Nature. 2010. Vol. 464. no. 7285. P. 45-53.
6. Knill Emanuel. Quantum computing with realistically noisy devices // Nature. 2005. Vol. 434, no. 7029. P. 39-44.
7. DiVincenzo David P. The physical implementation of quantum computation // Fortschritte der Physik: Progress of Physics. 2000. Vol. 48. no. 9-11. P. 771-783.
8. Mizel Ari, Lidar Daniel A., Mitchell Morgan. Simple proof of equivalence between adiabatic quantum computation and the circuit model // Physical review letters. 2007. Vol. 99. no. 7. P. 070502.
9. Gershenfeld Neil A., Chuang Isaac L. Bulk spin-resonance quantum computation // science. 1997. Vol. 275. no. 5298. P. 350-356.
10. Blatt Rainer, Wineland David. Entangled states of trapped atomic ions // Nature. 2008. Vol. 453. no. 7198. P. 1008-1015.
11. Observation of Rydberg blockade between two atoms / E Urban, Todd A Johnson, T Henage et al. // Nature Physics. 2009. Vol. 5, no. 2. P. 110-114.
12. Lithographic alignment to site-controlled quantum dots for device integration / Schneider C., Straub M., Sunner T. et al. // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. no. 18. P. 183101.

Галашева Елена Николаевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы № B3464,
направление подготовки: 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,
e-mail: lena.galasheva2011@yandex.ru
Денисюк Игорь Юрьевич
Год рождения: 1956
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. МНЛ НОМКиМ,
e-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

УДК 535.345.1

СЕНСОР ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ РОДАМИНА Б, ИММОБИЛИЗИРОВАННОГО В ГИДРОГЕЛЕВОЙ ПЛЁНКЕ

Е.Н. Галашева
Научный руководитель – д.ф.-м.н. профессор И.Ю. Денисюк

Аннотация
В ходе работы был создан сенсор тяжёлых металлов для контроля их содержания в воде, основанный на комплексообразовании Родамина Б с тяжёлыми металлами. Проведены иммобилизация красителя в гидрогелевой плёнке и проверка молекулярного состояния Родамина Б в плёнке. Установлена чувствительность сенсора к ионам меди в воде, составляющая 0,1 мг/л. Исследована чувствительность к ионам свинца и выдвинуто предположение о возможности создания аналогичного сенсора для них.

Ключевые слова
Сенсор тяжелых металлов, Родамин Б, фотополимер, хемосенсор, медь, спектр поглощения, гидрогель.

Загрязнение водоёмов на протяжении многих лет несёт огромную опасность флоре и фауне. Среди загрязняющих веществ одними из наиболее вредных веществ являются тяжёлые металлы. Они переносятся с грунтовыми водами от золотвалов, а также со сточными водами в водные объекты, из которых с питьевой водой могут попасть в организм человека, нанося вред его здоровью, который впоследствии может привести к летальному исходу. Это приводит к необходимости надзора за количеством тяжёлых металлов в воде.

Основными методами определения тяжёлых металлов в воде являются рентгеновская флуоресцентная спектроскопия, индуктивносвязанная плазмо-масс-спектрометрия, атомно-абсорбционная спектрометрия. Данные методы высокочувствительны, однако требуют больших финансовых затрат на оборудование, его обслуживание, транспортировку образцов, а так же являются не мобильными, что делает их использование низкоэффективным во время аварий и утечек, поэтому разработка и создание малогабаритных простых в использовании сенсоров является актуальным направлением для современной науки.

В качестве индикаторов в сенсорах могут быть использованы красители, которые при взаимодействии с искомыми ионами образуют комплекс и изменяют свои оптические свойства, что проявляется в визуальном изменении красителя, а именно смене окраски, спектров люминесценции и поглощении. Подобным красителем является Родамин Б. Комплексообразование тяжёлых металлов с молекулами Родамина Б происходит за счёт водородных связей [1].

Для того чтобы создать сенсор необходим не только индикатор, но и каркас, на котором он может быть закреплён. Из [2] можно сделать вывод, что для этих целей подходящим каркасом является гидрофильная гидрогелевая плёнка.

Целью данной работы является разработка и создание сенсора тяжёлых металлов для контроля их содержания в воде, основанного на комплексообразовании Родамина Б с тяжёлыми металлами. Для этого были проведены спектрофотометрические и спектролюминесцентные исследования раствора Родамина Б при добавлении тяжёлых металлов, а также создана гидрогелевая плёнка с иммобилизированным на ней Родамином Б.

Для проверки чувствительности Родамина Б в молекулярном состоянии были проведены исследования красителя в растворе. Готовились рабочий растворы Родамина Б в изопропиловом спирте с концентрацией 1 мг/л, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ в изопропиловом спирте и $Pb(CH_3COO)_2$ в изопропиловом спирте. Концентрация ионов меди в растворе с Родамином изменялась от 0,1 до 1000 мг/л; а свинца – от 0,1 до 5 мг/л.

Далее изготавливалась полимерная гидрогелевая плёнка. В смесь полиэтиленгликоля (PEG), феноксиэтилакрилата (PEA), триметилолпропан этоксилат (1EO/OH) метиловый эфир диакрилата (TMP) и 2-карбоксиэтил акрилата (2-Car) (2-Car:TMP:PEA=75:15:10 и 2-Car:PEG=1:2 по весу) добавлялся спиртовой раствор Родамина Б (0,1% порошка по общей массе смеси, растворенный в изопропиловом спирте). Следующим шагов в приготовление было испарение спирта, после которого в смесь был добавлен инициатор УФ полимеризации 2,2-диметокси-2-фенилацентофенон. Далее формировалась и под воздействием УФ - излучения полимеризовалась плёнка толщиной 300 мкм. Готовая плёнка погружалась в дистиллированную воду, в которую добавлялся водный раствор $CuCl_2 \cdot 2H_2O$. Концентрация ионов меди в конечном растворе повышалась от 10 до 1000 мг/л.

Результаты измерений спектров поглощения показали зависимость изменения пика оптической плотности от концентрации меди при добавлении раствора, содержащего её ионы (рис. 1).

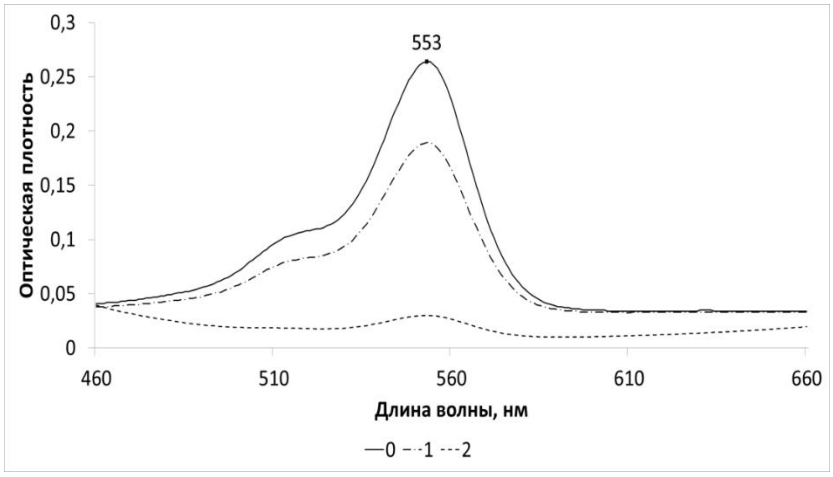


Рис. 1. Спектр поглощения спиртового раствора красителя
Родамина Б (концентрация Родамина Б = 0,001 мг/мл): 0-концентрация меди = 0 мг/мл;
1-концентрация меди = 0,01 мг/мл; 2-концентрация меди = 1 мг/мл

Из спектра поглощения спиртового раствора красителя видно из представленного выше графика пик поглощения Родамина Б находится на длине волны λ=553 нм и значительно понижается в результате образования комплекса с медью, что отражается в зависимости амплитуды максимума при 553 нм от концентрации меди, представленной на (рис. 2).

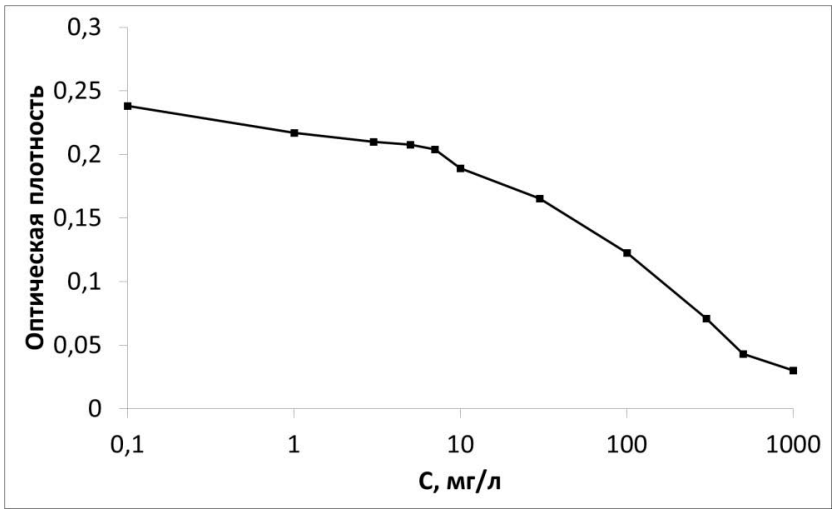


Рис. 2. График зависимости амплитуды максимума при 553 нм от концентрации меди

Данное свойство использовано в разработке сенсора, описанного далее.

Аналогичные измерения были проведены для раствора Родамина Б с добавлением ионов свинца (рис. 3). Они показали, что при повышении концентрации данного тяжёлого металла до 0,005 мг/мл максимум оптической плотности понижается относительно максимума раствора Родамина без добавления свинца. Данное свойство может быть исследовано подробнее в дальнейшем и использовано при создании аналогичного сенсора.

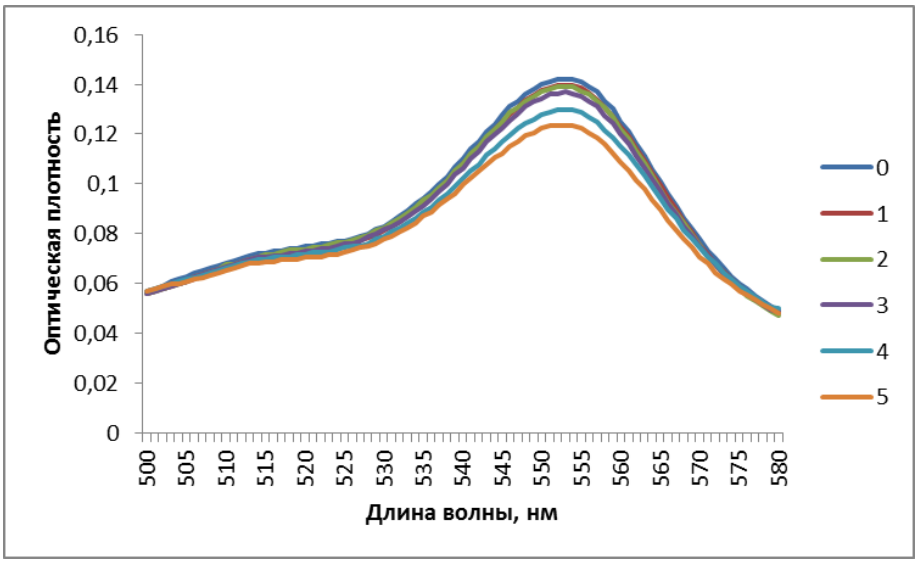


Рис. 3. Спектр поглощения спиртового раствора красителя Родамина Б (концентрация Родамина Б = 0,001 мг/мл): 0-концентрация свинца = 0 мг/мл; 1-концентрация свинца =0,0001 мг/мл; 2-концентрация свинца =0,0003 мг/мл; 3-концентрация свинца =0,001 мг/мл; 4-концентрация свинца =0,003 мг/мл; 5-концентрация свинца =0,005 мг/мл

Как было сказано ранее, результат измерения спектра поглощения раствора красителя при добавлении ионов меди, лёг в основу сенсора данного металла. Из рис. 4 видно, что при повышении концентрации ионов меди пик поглощения также понижается, что свидетельствует о молекулярном состоянии Родамина Б в плёнке, что значит, что данный сенсор может быть использован для контроля содержания тяжёлых металлов в воде.

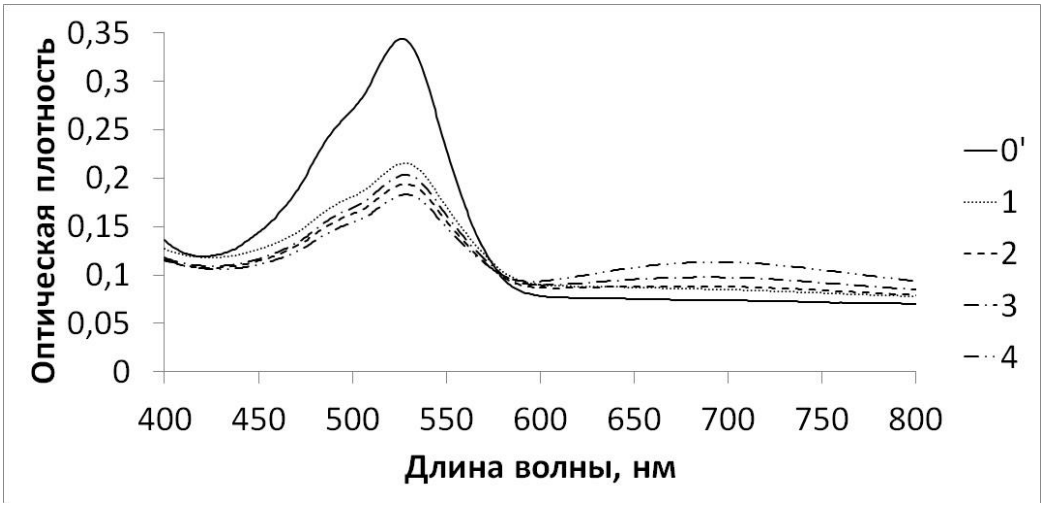


Рис. 4. Спектр поглощения полимерной плёнки с красителем
Родамином Б: 0’- концентрация меди = 0 мг/мл (после погружения в дистиллированную воду);
1-концентрация меди = 0,1 мг/мл; 2-концентрация меди = 0,3 мг/мл;
3-концентрация меди = 0,5 мг/мл; 4-концентрация меди = 1 мг/мл.

Исследования спектров люминесценции раствора Родамина Б не показали зависимости в изменении пика интенсивности для обоих металлов.

Подводя итог, можно сделать вывод, что при взаимодействии Родамина Б с ионами меди максимум поглощения значительно понижается. Данное свойство реализуется в гидрофильном полимерном сенсоре, описанном в работе. Было установлено, что при введении красителя в гидрогелевую матрицу он сохраняет своё молекулярное состояние и показывает чувствительность по отношению к ионам меди равную 0,1 мг/л. В свою очередь, ПДК для сточных вод составляет 1 мг/л. Из сказанного можно сделать вывод, что данный сенсор может быть использован для контроля содержания ионов меди в сточных водах.

Результаты измерений были представлены в статье «Сенсор ионов меди на основе Родамина Б, иммобилизированного в фотополимерной пленке» [3].

Литература

1. Kim H.N., Lee M.H., Kim H.J., Kim J.S., Yoon J. A new trend in rhodamine-based chemosensors: application of spirolactam ring-opening to sensing ions//Chemical Society Reviews. 2008. V. 37. No. 8. P. 1465–1472.
2. Денисюк И.Ю., Игнатьева Ю.А., Успенская М.В., Фокина М.И. Нанокомпозиционный оптосенсор ионов свинца в воде // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. В. 6. С. 748–750.
3. Денисюк И.Ю., Галашева Е.Н., Успенская М.В. Сенсор ионов меди на основе Родамина Б, иммобилизированного в фотополимерной пленке// Оптика и спектроскопия. 2020. (в печати).

Голобородько Людмила Игоревна
Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы №B3405
направление подготовки: 12.03.02 – Оптотехника,
e-mail: ludagoloborodko@yandex.ru
Чертов Александр Николаевич
Год рождения: 1982
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н., доцент,
e-mail: a.n.chertov@mail.ru

УДК 004.932, 681.78

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ

Л.И. Голобородько
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.Н. Чертов

Работа выполнена в рамках ВКР бакалавра «Исследование мультиспектральной оптико-электронной системы для диагностики цветных камней».

Аннотация
В работе рассмотрена возможность применения мультиспектральной съемки для диагностики цветных драгоценных камней. Сделан обзор диагностических свойств и методов диагностики, обоснован выбор именно мультиспектрального метода съемки, выполнен габаритно-энергетический расчет, разработан комплект конструкторской документации и методика проведения экспериментальных исследований.
Ключевые слова
Мультиспектральная съемка, гиперспектральная съемка, геммология, колориметрия, спектроскопия, микроскопия, цветные драгоценные камни.

Ювелирные изделия во всем мире являются одними из наиболее частых объектов фальсификации. В настоящее время различается около 200 разновидностей природных ювелирных камней. Также существует огромное количество так называемых синтетических продуктов, которые можно разделить на 3 группы: синтетические ювелирные камни, имеющие природные аналоги; синтетические материалы, не имеющие природных аналогов; имитации ювелирных камней (стекла, смолы, дублеты и триплеты) [1]. Помимо того, зачастую для улучшения свойств камня применяется облагораживание, что еще больше усложняет его идентификацию и оценку. Поэтому обычному человеку крайне трудно, не имея специальных знаний и умений, однозначно определить подлинность приобретаемого камня.

Актуальность работы обусловлена тем, что геммологическая диагностика в настоящее время является достаточно сложной задачей в силу большого разнообразия цветных драгоценных камней (ЦДК) и способов их облагораживания, их синтетических аналогов и подделок. Методики же выявления различных признаков не универсальны.

Целью работы является исследование возможностей по применению мультиспектральной съемки для диагностики ЦДК. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: обзор диагностических свойств и методов диагностики ЦДК; определение различий методов мультиспектральной (МС) и гиперспектральной (ГС) съемки; выполнение габаритно-энергетического расчета, выбор элементной базы, создание комплекта КД, разработка методики проведения экспериментальных исследований.

Свойства камней, имеющие диагностическое значение, можно объединить в 3 группы: физические, оптические, структурные и кристаллографические [1]. К физическим относятся такие как плотность, твердость, спайность, излом. По ним можно, как правило, отличить камень от подделки из стекла или смол, однако однозначно различить натуральный камень и его синтетический аналог не получится, потому что по физическим свойствам они крайне близки [3].

Оптические свойства ЦДК включают в себя цвет и характер окраски, прозрачность, блеск, дисперсию, люминесценцию. Цвет и окраска, равно как и прозрачность, являются факторами, определяющими его ценность, но при этом не является надежным диагностическим признаком в силу многообразия минералов. В настоящее время гораздо чаще исследуются спектры поглощения или отражения минералов благодаря большей точности и объективности [3]. Блеск определяется отражательной способностью и состоянием поверхности камня и оценивается визуально. Также для идентификации драгоценных камней применяется анализ спектров люминесценции и карты распределения ее интенсивности.

Третья группа свойств – структурные и кристаллографические. К ним относятся различные характерные включения и микроструктуры роста, зональность окраски, двойникование. По этим свойствам камней можно судить об их происхождении и условиях образования, и как следствие различать натуральные и искусственные камни [2].

Таким образом, наибольший интерес для анализа представляют спектральные характеристики и различные особенности микроструктуры. Исходя из этого, в работе уделено внимание рассмотрению методов геммологической диагностики, позволяющих исследовать именно эти группы свойств, а именно колориметрии, спектроскопии и микроскопии.

Для описания цвета камня по всему миру используется система оценки цвета GIA [3]. Она выделяет 31 базовый цветовой оттенок, на основе которого формируется цвет, 11 тонов, характеризующих степень интенсивности оттенка, и 6 уровней насыщенности. Определение цвета осуществляется при помощи колориметра, спектрометра или по цветовым эталонам GIA экспертом вручную.

Спектроскопические методы дают возможность сделать заключение о химическом составе рассматриваемого ЦДК, количественном и качественном содержании каких-либо примесей, природе его окраски, иногда – о присутствии в камне смол, парафина или стекла, клеев, что может свидетельствовать о его облагораживании. Все спектроскопические методы основаны на поиске особых маркеров присутствия того или иного химического элемента в камне по спектрам отражения или пропускания образца [2]. Использование микроскопа позволяет обнаружить различные характерные особенности микроструктуры и окраски, примеси, дефекты и другие особенности, позволяющие судить о подлинности камня.

Спектроскопия и микроскопия на данный момент являются наиболее широко используемыми в геммологической диагностике методами. Также находят применение комбинированные методы, например, рамановская микроскопия, осуществляемая посредством сопряжения портативного рамановского спектрометра с видеомикроскопом с необходимым увеличением [2]. Этим объясняется интерес к

возможности применения ГС и МС методов для диагностики ЦДК.

МС и ГС съемка позволяют захватывать и соотносить пространственную и спектральную информацию, и основным различием между ними является спектральное разрешение. ГС визуализация использует непрерывный диапазон длин волн с определенным шагом, в то время как МС визуализация использует несколько дискретных диапазонов длин волн (рис. 1) [4]. Вследствие небольшого спектрального разрешения, низкого контраста, обусловленного широкополосным фоновым пропусканием, информативность МС изображения снижена по сравнению с ГС.

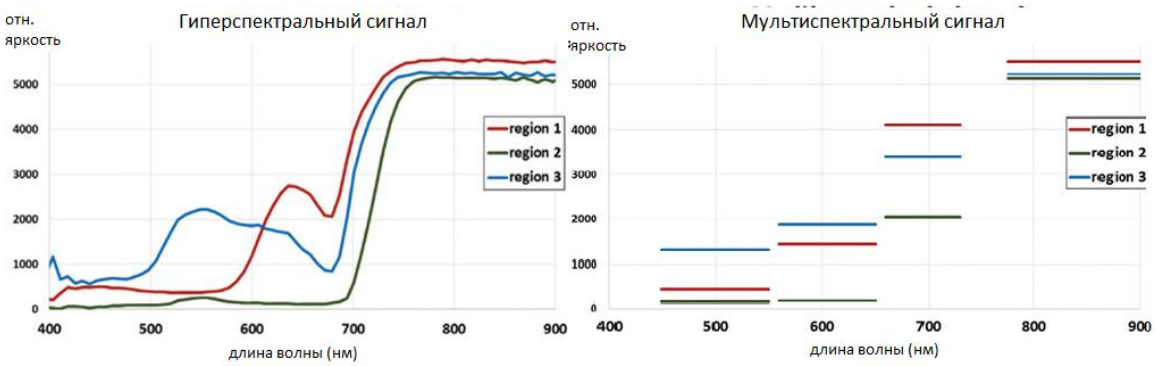


Рис. 1. Сравнение объема ГС (слева) и МС (справа) данных,
полученных из трех различных точек изображения соответственно (region 1, 2, 3)

При том для решения конкретных задач объем ГС данных может быть избыточен. Когда искомая спектральная информация сгруппирована в нескольких дискретных диапазонах, более рационально использовать МС метод съемки. Так как возможность содержания тех или иных веществ в диагностируемом камне предсказуема и объясняется его происхождением или методом изготовления, предполагается достаточность метода МС съемки в проходящем свете для диагностики ЦДК.

В разрабатываемом макете устройства для диагностики ЦДК в качестве источника излучения используется лампа накаливания, излучение которой при помощи конденсора и зеркала направляется на объект, расположенный на прозрачном предметном стекле. Далее свет проходит через один из светофильтров, закрепленных на барабане, поворачивающемся управляемым шаговым двигателем. Затем свет проходит через объектив и попадает на КМОП-матрицу высокого разрешения.

В ходе разработки системы был выполнен габаритно-энергетический расчет, целью которого является согласование компонентов системы. В процессе его выполнения были определены параметры элементов макета и выбран источник оптического излучения. В качестве него выступает лампа накаливания ОП-6-15. Световой поток лампы равен 225 лм. Был выполнен синтез конденсора из двух плоско-выпуклых линз GCL 010108B, а также определены материал зеркального покрытия – алюминиевое, габариты (22×30 мм) и требуемая точность поверхности зеркала. Для выбранной КМОП-матрицы CMV4000 формата 1”, входящей в состав камеры XIMEA xiQ MQ042RG-CM, были рассчитаны отношение сигнал/шум (SNR=46 дБ) и ток шума (I_{noise}=17 $e^-/_{мкс}$) [5]. Также для данной системы выбран объектив KOWA LM75HC с параметрами f=75 мм; $2\beta_0$=19,4°; D/f'=1:1.8; τ_0=0,8. В результате выполнения расчета стала возможна разработка комплекта конструкторской документации.

Далее были разработаны оптическая схема и сборочный чертеж макета МСОЭС для диагностики ЦДК, вид с которого показан на рис. 2. Свет от лампы накаливания 3 с помощью конденсора 4 и отражателя 5 направляется на предметное стекло 6. Далее

излучение проходит через один из светофильтров, закрепленных на барабане 8, и через объектив 12 попадает на фотоприемную матрицу камеры 11. Барабан светофильтров поворачивается на валу шагового двигателя 7. Узел излучателя, состоящий из лампы накаливания 3, конденсора из двух плоско-выпуклых линз 4 и зеркала 5, закреплен на плате основания 1 и закрыт корпусом 2. Через отверстие в корпусе свет попадает на предметное стекло, установленное на предметном столике 7, крепящемся к корпусу тремя винтами. Светофильтры закреплены на специальном барабане 8, который способен поворачиваться вокруг своей оси при помощи шагового двигателя 6, прикрепленного к корпусу уголком. Объектив 12 соединяется с камерой 11 креплением C-Mount. Камера зафиксирована при помощи уголка 10 на стойке 9, а она в свою очередь установлена на плату основания.

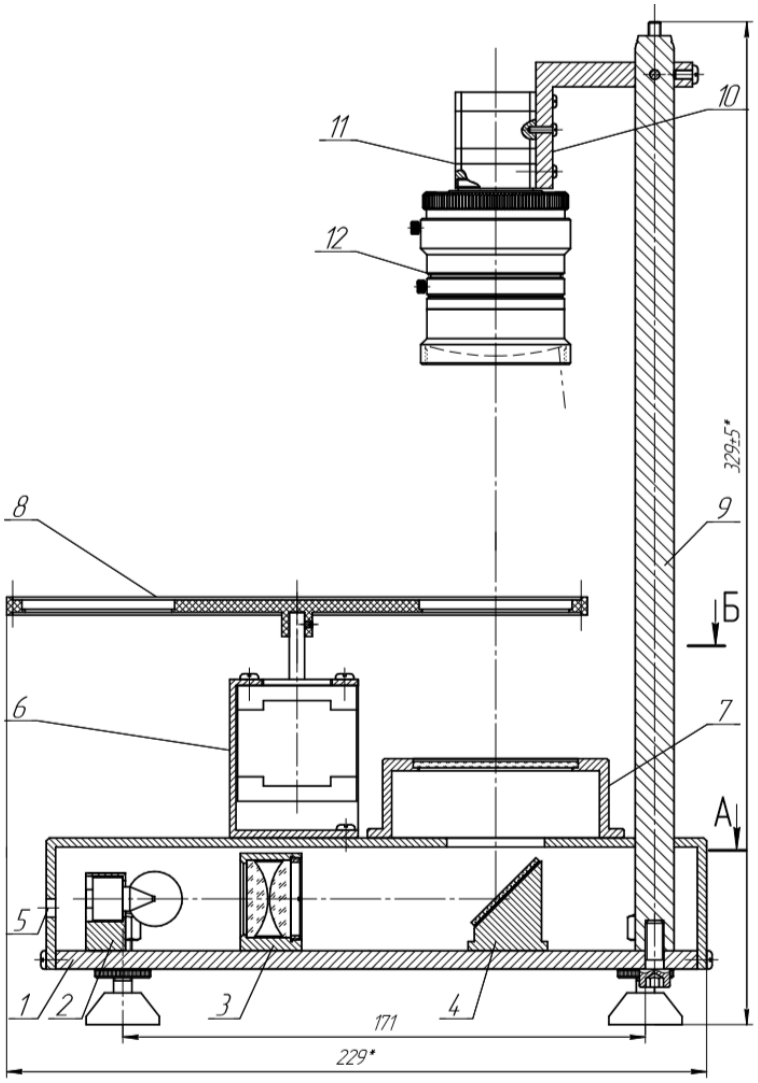


Рис. 2. Конструкция макета МСОЭС для диагностики ЦДК

Также была разработана методика проведения экспериментальных исследований, которая состоит в следующем:

1. Подключение лампы подсветки ОП-6-15 к источнику питания.
2. Подключение камеры XIMEA xiQ MQ042RG-CM к персональному компьютеру.

3. Установка светофильтров на барабан. Подключение шагового двигателя к блоку управления. Барабан со светофильтрами поворачивается на 60° по часовой стрелке с временной задержкой.

4. Калибровка источника для каждого из набора светофильтров.

5. Исследуемый камень помещается на предметный столик.

6. Съемка серии изображений исследуемого камня через каждый светофильтр с заданным временем интегрирования.

7. Обработка полученных изображений, вычисление спектральных индексов для анализируемого камня, его дефектов и включений. Полученные данные анализируются и сопоставляются с эталонными характеристиками камней и материалов с целью оценки подлинности и выявления облагораживания.

В результате выполнения данной научно-исследовательской работы была исследована возможность применения мультиспектрального метода съемки для диагностики цветных драгоценных камней. Для этого были рассмотрены диагностические свойства ЦДК и методы геммологической диагностики, выполнен габаритно-энергетический расчет системы, разработан комплект конструкторской документации и методика проведения экспериментальных исследований.

Литература

1. Корнилов Н.И., Солодова Ю.П. Ювелирные камни. Под ред. Гинзбурга Н.И., Недра М. 1983. 239 с.
2. Технологии и методы // Геммологический центр МГУ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gem-center.ru/technology.htm (дата обращения: 28.04.2020).
3. Мельников Е.П., Ножкина А.В. Состояние и проблемы диагностики драгоценных камней и промышленных минералов // ГИАБ. 2015. №9.
4. Telmo Adão, Jonás Hruska, Luís Pádua, José Bessa, Emanuel Peres, Raul Morais, Joaquim João Sousa Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry // Remote Sensing. 2017. №9 (11).
5. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Парвулюсов Ю.Б., Родионов С.А., Солдатов В.П. и др.; Под. ред. Якушенкова Ю.Г. М. Логос. 2000. 488 с.: ил.

Голованов Андрей Андреевич
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы № N3451,
направление подготовки: 10.03.01. – Информационная безопасность,
e-mail: agolovanov2403@gmail.com
Беззатеев Сергей Валентинович
Год рождения: 1957
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
д.т.н., профессор,
e-mail: bsv@aanet.ru

УДК 004.056:342.843.32

РАЗРАБОТКА ПРОТОКОЛА ЗАЩИЩЁННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ АНОНИМНОГО ГОЛОСОВАНИЯ

А.А. Голованов
Научный руководитель – д.т.н., профессор С.В. Беззатеев

Аннотация
Работа посвящена протоколам удалённого электронного голосования. Изучены особенности разработки протоколов голосования и определены требования к электронному голосованию. Проанализированы существующие протоколы голосования на соответствие определённым требованиям. Разработан протокол голосования, удовлетворяющий большему числу требований, чем аналоги. Проведена оценка соответствия требованиям разработанным протоколом.
Ключевые слова
Электронное голосование, протоколы голосования, эффективность протоколов голосования, отслеживаемая кольцевая подпись, смешанная сеть.

Организация традиционного голосования сталкивается со множеством проблем, такими как: ошибки в подсчёте и низкая скорость подсчёта голосов, давление на электорат, искажение результатов и сложность верификации результатов в условиях сохранения тайны голосования, низкая явка избирателей и стоимость проведения голосования – удалённое электронное голосование призвано решить эти проблемы [1]. Несмотря на преимущества перехода от традиционного голосования к электронному, до сих пор не существует решения, которое бы удовлетворяло всем требованиям безопасности к проведению голосования, а именно:

1) корректность – все действительные голоса должны быть корректно подсчитаны;
2) устойчивость к недействительным голосам – все недействительные голоса должны быть исключены из подсчёта;
3) анонимность – соблюдение тайны голосования;
4) устойчивость к множественным голосам – ни один избиратель не имеет право отдать больше одного голоса;
5) легитимность избирателей – к голосованию должны быть допущены только лица, имеющие на это право;

6) устойчивость к предубеждению – промежуточные результаты подсчёта не должны быть раскрыты до окончания голосования;

7) устойчивость к фальсификации – ни одно лицо не должно фальсифицировать голосование, возможность проверки честности организаторов голосования;

8) надёжность – ни одна группа лиц не должна нарушить ход голосования;

9) всеобщая верифицируемость – возможность общественности проверить корректность проведения голосования;

10) независимость от извещений – независимость от информации, позволяющей избирателю доказать свой отданный голос;

11) возможность пересмотра мнения – возможность избирателя изменить отданный голос;

12) удобство – порядок подачи голоса не должен быть неудобным для избирателя;

13) гибкость – протокол может поддерживать разные форматы бюллетеней;

14) эффективность – организация голосования должна задействовать разумное количество ресурсов.

Перечень этих требований общепринят среди исследователей в данной области и используется для анализа и оценки той или иной схемы электронного голосования, а также их сравнения [2].

В основе схемы электронного голосования лежит протокол голосования – правила, описывающие участников и порядок обмена данными в ходе электронного голосования. Существующие протоколы голосования можно разделить на два типа, в зависимости от используемых криптографических примитивов: протоколы на основе анонимного канала и протоколы на основе гомоморфных криптографических функций. Принципиальное отличие этих типов состоит в способе обеспечения анонимности: протоколы первого типа подразумевают передачу подсчитывающему органу обезличенного бюллетеня по анонимному каналу; в то время как протоколы второго типа подразумевают открытую публикацию зашифрованных бюллетеней с привязкой к личности избирателя, которые затем складываются в общий подсчёт без расшифровки отдельных бюллетеней. При проведении классификации существующих протоколов они также были объединены в семейства, основываясь на используемых в них дополнительных технологиях.

Протоколы, основанные на анонимных каналах:

1. Протокол Чаума на основе цифровых псевдонимов. Использует цифровые псевдонимы – открытый ключ цифровой подписи, ассоциированный с закрытым ключом избирателя, но не привязанный к его личности.
2. Протоколы на основе многоключевого шифра. Используют многоключевую асимметричную криптосистему Бойда.
3. Протоколы на основе слепой подписи. Слепая подпись Чаума используется для подтверждения легитимности избирателя без нарушения требования анонимности.
4. Протокол на основе кольцевой подписи. Прослеживаемая кольцевая подпись Фудзисаки и Сузуки использована для подтверждения легитимности избирателя – принадлежности множеству легитимных избирателей.

Протоколы, основанные на гомоморфных криптографических функциях:

1. Протоколы Бенало. Используется гомоморфная функция шифрования на основе слабой задачи остатков.
2. Протокол Иверсена. Используется гомоморфная функция Иверсена, а также токены легитимности.
3. Протокол на основе криптосистемы Эль-Гамаля. Помимо криптосистемы Эль-Гамаля, протокол также использует схему распределённой генерации ключа.

4. Протоколы на основе криптосистемы Пэйе.

Проведённый анализ данных семейств протоколов даёт возможность сравнить их по соответствию 14 требованиям, предъявляемым к протоколам голосования. Данное сравнение вместе с предлагаемым в данной работе протоколом приведено на рис. 1. Можно заметить, что протоколам, основанным на анонимных каналах, характерно соответствие требованию гибкости, а протоколам, основанным на гомоморфных функциях – всеобщей верифицируемости. Протокол на основе кольцевой подписи в этом отношении уникален, т. к. он одновременно отвечает этим двум требованиям. Разработанная в ходе данной работы модификация этого протокола решает проблему несоответствия следующим требованиям:

1) устойчивости к предубеждению;
2) устойчивости к фальсификации:
3) эффективности.

Семейства протоколов	**Требования к протоколам голосования***													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Протокол Чаума	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□	■	■	□
Протоколы на основе многоключевого шифра	■	■	▨	■	■	▨	□	□	□	■	□	■	■	■
Протоколы на основе слепой подписи	■	■	■	■	■	■	▨	■	□	□	□	▨	■	▨
Протокол на основе кольцевой подписи	■	■	■	■	■	□	□	■	■	■	□	■	■	□
Протоколы Бенало	■	▨	▨	■	■	▨	■	▨	■	■	□	■	□	□
Протокол Иверсена	■	■	■	■	■	■	■	□	■	□	□	■	□	■
Протокол на основе криптосистемы Эль-Гамаля	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	■	□	■
Протоколы на основе криптосистемы Пэйе	■	■	■	■	■	■	■	■	■	▨	□	■	□	■
Предлагаемый протокол	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■

* Требования: 1 – корректность; 2 – устойчивость к недействительным голосам; 3 – анонимность; 4 – устойчивость к множественным голосам; 5 – легитимность избирателей; 6 – устойчивость к предубеждению; 7 – устойчивость к фальсификации; 8 – надёжность; 9 – всеобщая верифицируемость; 10 – независимость от извещений; 11 – возможность пересмотра мнения; 12 – удобство; 13 – гибкость; 14 – эффективность.

■ – полное соответствие, ▨ – частичное соответствие, □ – несоответствие.

Рис. 1. Сравнение протоколов голосования по соответствию требованиям

Прослеживаемая кольцевая подпись – криптографический примитив, позволяющий создать кольцевую подпись – доказательство, что автор некоторого сообщения m является участником группы лиц r, называемой кольцом [3]. Также имеется возможность проверить, созданы ли две подписи одним лицом. Для этой схемы необходимо, чтобы у участников кольца были специальные пары из открытого и закрытого ключей (pk_i, sk_i). Схема состоит из 3 функций:

1) SIGN – функция создания кольцевой подписи:

$$\sigma = \mathrm{SIGN}\left(m,\ \{pk_i\}_{i=1}^{N}, sk_j\right), \quad (1)$$

где σ – созданная подпись, m – подписываемое сообщение (бюллетень в контексте голосования), $\{pk_i\}_{i=1}^{N}$ – множество открытых ключей участников кольца, sk_j – закрытый ключ подписывающего;

2) VERIFY – функция проверки кольцевой подписи:

$$\mathrm{VERIFY}(m, \sigma,\ \{pk_i\}_{i=1}^{N}) \in \{\mathrm{True}, \mathrm{False}\}, \quad (2)$$

которая возвращает значение True, если σ – действительно кольцевая подпись сообщения m от лица кольца r с множеством ключей $\{pk_i\}_{i=1}^{N}$, и False – иначе;

3) TRACE – функция проверки двух кольцевых подписей на одного автора:

$$\mathrm{TRACE}(m_1, \sigma_1, m_2, \sigma_2,\ \{pk_i\}_{i=1}^{N}) \in \{\mathrm{indep}, \mathrm{linked}, pk_i\}, \quad (3)$$

где m_1 и m_2 – два сообщения, σ_1, σ_2 – их кольцевые подписи соответственно.

Функция TRACE возвращает значение indep, если автор разный; linked, если автор один и $m_1 = m_2$; открытый ключ автора pk_i, если автор один и $m_1 \neq m_2$.

Оригинальный протокол на основе кольцевой подписи подразумевает 2 участников: избирателя v_i и администратора A, и состоит из 3 этапов:

1. **Подготовительный этап.** Избиратель v_i генерирует (pk_i, sk_i) и регистрируется у A: отправляет ему свои идентификатор и открытый ключ (id_i, pk_i). A подтверждает легитимность v_i и публикует открытые ключи всех избирателей в едином открытом реестре.
2. **Голосование.** Избиратель v_i формирует бюллетень B_i и на основе открытых ключей всех избирателей и создаёт его кольцевую подпись σ_i по формуле (1). Избиратель через анонимный канал публикует (id_r, B_i, σ_i) на публичной доске объявлений.
3. **Подсчёт голосов.** A, либо любое другое лицо, проводит проверку подписей: верифицирует по формуле (2) и находит множественные бюллетени от одного автора по формуле (3), исключает недействительные голоса. Затем производит подсчёт корректных бюллетеней и публикует результат.

В оригинальном протоколе кольцевая подпись линейно зависит от размера кольца, т. е. количества избирателей: при размере ключа 256 байт и 100 млн избирателях размер подписи достигает 51,2 Гбайт, что недопустимо при голосовании государственного масштаба и считается нарушением требования эффективности. Предлагаемая модификация заключается в том, что все зарегистрированные избиратели по окончании регистрации должны быть разделены на случайные группы, так называемые кольца, число элементов в которых определяется заранее заданным значением N_r. с кольцевой подписью проводятся только с открытыми ключами участников конкретного кольца, все бюллетени обрабатываются в связке с остальными бюллетенями этого кольца. При $N_r = 1000$ сохраняется приемлемый уровень анонимности, сравнимый с имеющимся на Президентских выборах РФ, проводимых в традиционной форме голосования, и при этом резко сокращаются объёмы обрабатываемой информации – удаётся повысить эффективность в 100 000 раз, что видно из таблицы.

Таблица

Сравнение эффективности оригинального протокола и предлагаемой модификации

Схема	Размер подписи бюллетеня	Объём информации, хранимой P_2
Протокол на основе кольцевой подписи	51,200 Гбайт	5 120 000,00 Тбайт
Предлагаемая модификация	512,256 Кбайт	51,23 Тбайт

Также, поскольку в оригинальном протоколе не установлено, по какой именно технологии в этом протоколе реализован анонимный канал, мы предполагаем, что возможна публикация промежуточных результатов до окончания приёма голосов – это нарушение требования устойчивости к предубеждению. По этой же причине администратор может зарегистрировать несуществующих избирателей и анонимно проголосовать от их лица – нарушение требования устойчивости к фальсификации. Для решения этих двух проблем в предлагаемой модификации в качестве технологии анонимного канала выбрана смешанная сеть с повторным шифрованием [4]. Также, в предлагаемом протоколе используется 3 разных открытых реестра: реестр P_1 для публикации открытых ключей избирателей, реестр P_2 для публикации зашифрованных бюллетеней до анонимизации и реестр P_3 для публикации расшифрованных анонимизированных бюллетеней; и разделить этап голосования на два разных этапа:

1. **Голосование.** Избиратель, как и в исходном протоколе, формирует бюллетень B_i и создаёт его кольцевую подпись σ_i, но теперь ещё зашифровывает их вместе с идентификатором id_r кольца, которому принадлежит специальной функцией шифрования для смешанной сети:

$$u_{0,i} = \mathrm{E}_{pk_M}\big((id_r, B_i, \sigma_i), k\big),$$

и публикует $(id_r, u_{0,i})$ в P_2.

2. **Смешивание голосов.** Для каждого кольца проводится следующая процедура: из P_2 извлекается кортеж $L_0 = (u_{0,1}, \dots, u_{0,|r|})$ всех бюллетеней, принадлежащих кольцу, и обрабатывается смешанной сетью, в результате получая кортеж $L_m = \big((id_r, B_1, \sigma_1), \dots, \big(id_r, B_{|r|}, \sigma_{|r|}\big)\big)$ анонимизированных расшифрованных троек (id_r, B_i, σ_i), которые публикуются в P_3.

Эти меры позволяют избежать досрочной публикации промежуточных результатов, а также лишают администратора возможности анонимно проголосовать, т. к. публикация в P_2 не анонимна.

Общая схема предлагаемой модификации представлена на рис. 2. Цифрами обозначены этапы протокола:

1. Подготовительный этап.
2. Голосование.
3. Смешивание голосов.
4. Подсчёт голосов.

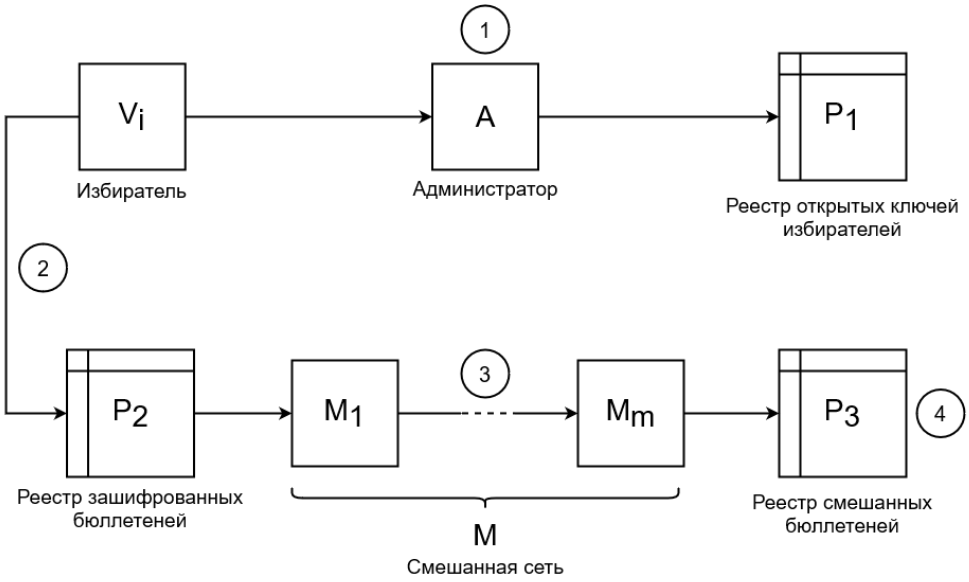


Рис. 2. Схема предлагаемого протокола

Включая предлагаемый протокол в общее сравнение (см. рис. 1), можно убедиться, что из 14 требований к электронному голосованию он отвечает 13, т. е. больше, чем у какого-либо из остальных протоколов. Таким образом, разработанный протокол голосования имеет более высокий уровень защищённости в сравнении с остальными протоколами голосования. По отношению к протоколу на основе кольцевой подписи его отличает более высокая эффективность, а также устойчивость к предубеждению и фальсификации. Возможные дальнейшие направления работы касаются большего повышения эффективности: использование схемы прослеживаемой кольцевой подписи сублинейного размера может уменьшить обрабатываемые объёмы информации ещё в 32 раза [5].

Литература

1. Худолей Д.М. Электронное голосование – необходимость для цифровизации избирательного процесса Российской Федерации // Пермский юридический альманах. 2019. №2. С. 163–170.
2. Røsland G. Remote Electronic Voting. University of Bergen / Geir Røsland. Bergen: University of Bergen, 2004. 99 p.
3. Fujisaki E., Suzuki K. Traceable Ring Signature // PKC'07: Proceedings of the 10th international conference on Practice and theory in public-key cryptography. Berlin. Heidelberg: Springer-Verlag. 2007. P. 181–200.
4. Park C., Itoh K., Kurosawa K. Efficient Anonymous Channel and All/Nothing Election Scheme // Advances in Cryptology – EUROCRYPT ’93. Berlin. Springer-Verlag. 1994. C. 248–259.
5. E. Fujisaki Sub-linear Size Traceable Ring Signatures without Random Oracles // Topics in Cryptology – CT-RSA 2011. Berlin: Springer-Verlag. 2011. C. 393–415.

Дакуо Жан-Мишель Никодэмович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности инофрмационных технологий,
студент группы №N3451,
направление подготовки: 10.03.01 – Организация и технология защиты информации,
e-mail: jeandakuo@mail.ru
Таранов Сергей Владимирович
Год рождения: 1991
Университет ИТМО,
факультет безопасности инофрмационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: serg.tvc@gmail.com

УДК 004.056.53

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМУ КРИПТОАНАЛИЗУ БЛОЧНЫХ ЛЕГКОВЕСНЫХ ШИФРОВ

Ж.-М. Н. Дакуо
Научный руководитель – к.т.н., доцент С.В. Таранов

Аннотация
В работе были рассмотрены шифры Present и DESL, проанализированы уязвимость их S-box к атакам дифференциального криптоанализа и атакам дифференциального криптоанализа с внедрением ошибок. На основе этой информации был разработан алгоритм противодействия дифференциальному криптоанализу для блочных легковесных шифров.
Ключевые слова
Дифференциальный криптоанализ, дифференциальный криптоанализ с внедрением ошибки, шифр Present, шифр DESL, bent-функция, система обнаружения ошибок CED.

Всё чаще повседневные вещи усиливаются путем встраивания в них мини компьютеров помощников. Массовое распространение Повсеместных вычислений (ubicomp) несёт за собой, с одной стороны, множество преимуществ (например, удобство использование технологий во всех аспектах жизни), но с другой стороны есть и значительные недостатки – многие из приложений на этих устройствах чувствительны к безопасности [1]. Так как и свободное пространство внутри устройств, и энергоемкость, и сложность отдельных составных частей устройства – это сильно ограниченные ресурсы (потому что он прямо влияет на стоимость). Для повсеместных вычислений будет реализована минимально необходимая вычислительная мощность.

Опираясь на данные из работы [2] о том, что на микропроцессорах выделяется до 20% вычислительной мощности на весь защитный блок устройства. И традиционные криптографические методы защиты информации становятся не применимы из-за свой большой ресурс затратности.

Чтобы уложиться в жесткие рамки, наложенные характеристиками устройства, необходимо обратиться к легковесной криптографии перспективной и многообещающей области современной криптографических систем защиты информации. Такой шифры как DESL, разработанный на основе DES, или Present потребляет значительно меньше ресурсов, за счет не значительной потери в

криптостойкости.

Дифференциальный криптоанализ (ДК) – это атака с подобранным открытым текстом. В первые она была предложена Эли Бихамом и Ади Шамиром [3]. Для проведения этой атаки нам нужен полный доступ к нему. Другими словами, нужно иметь возможность зашифровать любое количество простых текстов.

Цель ДК получить получение некоторой информации о ключе, которая в дальнейшем позволит скомпрометировать часть ключа или позволит узнать некоторую информацию, которая позволит получить преимущество при переборе ключа [4].

Это происходит таким образом: для заранее подобранных текстов P_1 и P_2 и вычисляется их дифференциал $\Delta P = P_1 \oplus \mathrm{P}_2$. И с помощью него пытаются установить каким будет дифференциал двух шифртекстов $\Delta \mathrm{C} = \mathrm{C}_1 \oplus \mathrm{C}_2$. Обычно нельзя со 100% вероятность сказать какое значение $\Delta \mathrm{C}$ будет возвращено для ΔP. Злоумышленник может узнать с какой вероятностью будут возвращаться различные значения $\Delta \mathrm{C}$ для с заранее заданного ΔP. Полученная таким путём информация в дальнейшем будет использована для получения информации о ключе.

Для примера рассмотрим дифференциальный крипто анализ трёх раундов тривиального блочного шифра, представленного на рис. 1.

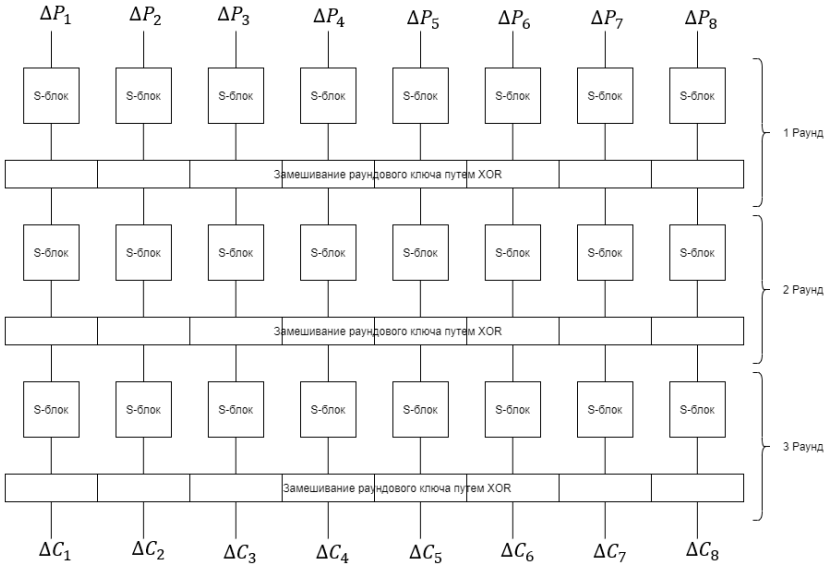


Рис. 1. Алгоритм блочного шифра

Представленный алгоритм блочного шифрования работает следующим образом: на вход идёт текстовая информация по 64 бита каждый блок и 128 битный ключ. Блок текстовой информации делится на части каждая по 8 бит каждая. Эти части проходят через S-box. А потом перемешиваются путём XOR их с раундовым 64 битным ключом.

Пусть злоумышленник проверяет дифференциал $\Delta X = 0x60$. Для этого генерируется пары X_1 и X_2: произвольным образом выбирается X_1 и на его основе получается $X_2 = X_1 \oplus 0x60$.

Далее X_1 и X_2 пропускаются через S-блок и на их основе получаются значения Y_1 и Y_2. Для каждой пары X_1 и X_2, дифференциал которой равен $0x60$, возможно получить $\Delta Y = Y_1 \oplus \mathrm{Y}_2$. И анализируя полученную информацию выбирается ΔY, который встречается чаще всего.

Пусть из всех 256 пар X_1 и X_2 в 192 случаях получается $\Delta Y = Y_1 \oplus \mathrm{Y}_2 = 0x04$. Вероятность того, что при заданном $\Delta X = 0x60$, что значение $\Delta Y = 0x04$ равна $\frac{192}{256} = \frac{3}{4}$. Другими словами, вероятность P_1 того, что при заданном $\Delta X = 0x60$ на вход второго

раунда попадут 2 значения U_1 и U_2 такие, что $\Delta U = 0x04$ составляет $P_1 = \frac{192}{256} = \frac{3}{4} = 75\%$.

Очевидно, что биты ключа никак не влияют на дифференциал. Так как при шифровании разных пар текстов ключ никак не изменяется, смешивание с раундовым ключом происходит путем побитового сложения по модулю 2, то при вычислении дифференциала биты ключа взаимно нивелируются.

Для анализа свойств второго раунда составляются новые 256 пар X_1 и X_2, такие что $\Delta X = X_1 \oplus \mathrm{X}_2 = 0x04$. Произведя идентичные манипуляции манипуляциям в первом раунде, вычисляется дифференциал $\Delta Y = Y_1 \oplus \mathrm{Y}_2$, и в 64 случаях из 256 $\Delta Y = Y_1 \oplus \mathrm{Y}_2 = 0x66$. Другими словами, что вероятность P_2 при заданном $\Delta X = 0x04$ на вход второго раунда попадут 2 значения U_1 и U_2 такие, что $\Delta U = 0x66$, $P_2 = \frac{64}{256} = \frac{1}{4} = 25\%$.

Можно сделать вывод, что если на вход шифра подаются такие два блока текста X_1 и X_2, такие что $\Delta X = 0x60$, то с вероятностью $P = P_1 * P_2 = \frac{1}{4} * \frac{3}{4} = \frac{3}{16} = 18{,}75\%$ дифференциал перед последним раундом шифрования будет равен $\Delta U = 0x66$.

Поле получения этого знания необходимо приступить к перебору раундового подключа в 3 раунде. Генерируется такие входные пары X_1 и X_2, такие что $\Delta X = X_1 \oplus \mathrm{X}_2 = 0x6060606060606060$. Для каждого из 256 вариантов первых 8 бит раундового подключа $Subkey_3[0]$ и для каждой пары шифр текстов C_1 и C_2 вычисляется $U_1 = S'(C_1 \oplus Subkey_3[0])$ и $U_2 = S'(C_2 \oplus Subkey_3[0])$, где S' это инвертированная функция S-блока .Если $Subkey_3[0]$ угадан правильно, то примерно $\frac{3}{16}$ всех дифференциалов всех пар U_1 и U_2 $\Delta U = 0x66$.

После подбора первых 8 вероятных бит раундового подключа $Subkey_3$, злоумышленник переходит к подборы оставшихся. Когда будет раскрыт весь подключе 3 раунда следует приступить к подбору подключа 2 раунда. В конечном итоге атакующий получит информацию о всех раундовых подключах данного блочного шифра. Схема атаки на шифр на рис. 2.

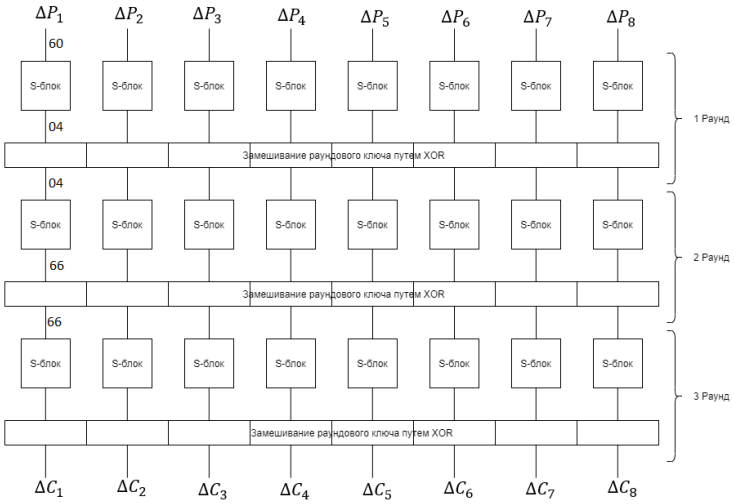


Рис. 2. Схема атаки на блочный симметричный
шифр с использованием дифференциального криптоанализа

Самыми сильными инструментами в руках крипто аналитика являются дифференциальный и линейный криптоанализы. На дифференциальном криптоанализе остановимся подробнее.

Чтобы измерить устойчивость шифра Present к дифференциальному криптоанализу, сначала надо определить что-такое активный S-box. Активный S-box – это S-box участвующий в получении дифференциальной характеристики. Случай ДК Present определяется теоремой доказанной в [5].

Теорема 1: Любые 5 раундов дифференциальной характеристики Present имеют минимум 10 активных S-box'ов.

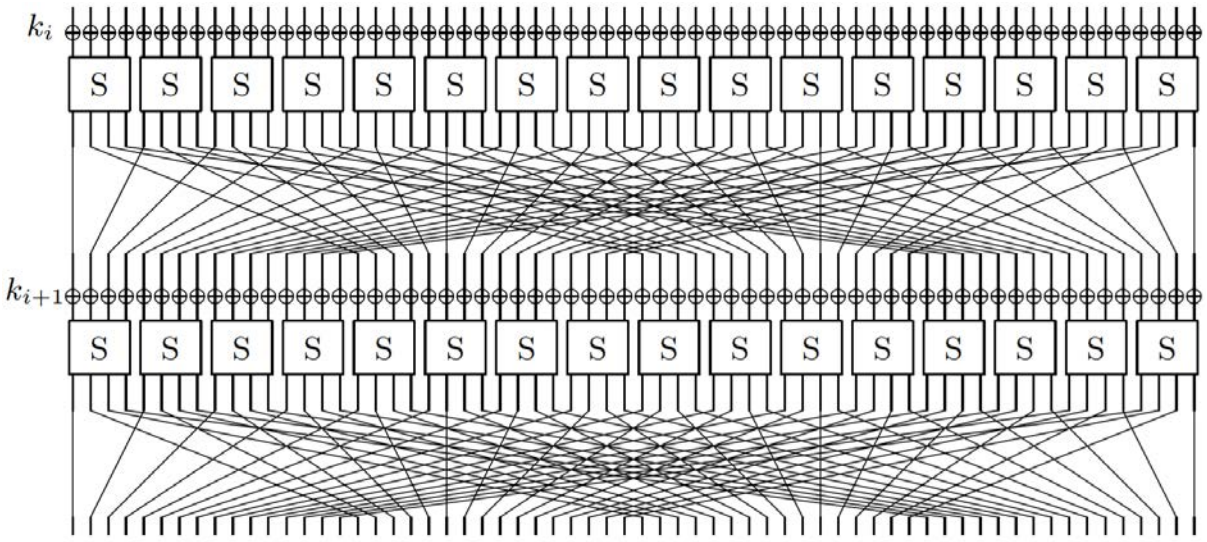


Рис. 3. Два раунда шифрования SP-сетью шифра Present

На рис. 3 можно визуально разделить все S-блоки на 4 группы по 4 S-блока в каждой. И исследуя слой простановки можно установить следующие:

1. Входные биты в S-box приходят от 4 разных S-box'ов одной группы.
2. Входные биты одной группы S-box'ов приходят от 16 разных S-box'ов.
3. 4 выходных бита из определённого S-box'а входят в 4 отдельных S-блоков, каждый из которых принадлежит отдельной группе S-блоков в следующем раунде.
4. Выходные биты S-box'ов в различных группах идут в различные S-box'ы.

Используя теорему 1, можно утверждать, что любая дифференциальная характеристика 25 раундов Present и больше будет иметь минимум $5 * 10 = 50$ активных S-box'ов. Максимальная возможная вероятность появления определённого выходного дифференциала Δ_O при заранее заданном входном дифференциале Δ_I равна $\frac{4}{16} = \frac{1}{4} = 2^{-2}$, а после прохождения 25 раундов, она составляет 2^{-100}. Хоть в 2007 году была проведена атака на Present [6], где группе криптоаналитиков удалось провести удачную атаку на 16 раундов Present с использованием 2^{64} входных текстов, а сложность по времени составляет 2^{65} доступов к памяти, но 31 раунд шифра им не поддался. Полученные результаты отваляют точку, от которой можно будет оттолкнутся в будущем. Продвинутые техники дифференциального криптоанализа, например такие как, ДК с внедрением ошибки или использование эксплойтов позволяющих убрать внешние раунды, но на этом подробнее остановимся далее.

Легковесные блочные шифры используются в реальных криптографических устройствах: в смарт-картах и RFID метках. Исследование [7] показало, что в шифрующих частях таких устройств можно вызывать ошибки, например, в некоторых смарт-картах можно вызвать ошибку просто переводя время. Хоть в наше время устройства защищают цепью обнаружения неисправностей. Такая защита встречается не часто, особенно для не дорогих устройств.

При атаке с внедрением ошибки, очевидно, что у злоумышленника есть полный

доступ к анализируемому устройству с секретным ключом. Нарушитель может получить любое количество пар текстов и шифртекстов, а также он может намерено мешать нормальной работе устройства разными путями: изменения напряжения или частоты питания, менять внешние часы или с помощью лазерной атаки и потом собирает неисправный выход.

Но из-за внедрения ошибки устройство портится. Например, сим-карта способна провести от 50 000 до 60 000 шифрований, а под действием атаки с внедрением это количество значительно сокращается до 1 000 – 10 000. Более того зачастую злоумышленник не может точно контролировать атаку, то есть он не знает какая ошибка и в какой раунд попадёт. Наиболее популярная ситуация заключается, что один или несколько S-блоков одного или нескольких раундов затронуты, и такие ошибки случайны.

В работе [8] у криптоаналитиков получилось за 2 часа с использованием 2 компьютеров и 10 000 получить последний раундовый ключ и 4 4-битных вектора предпоследнего раундового подключа. Сложность всей атаки составила $2^{36,3}$. Атка строится на анализе квадрате Евклидового расстояния до нормального распределения выходных значений раундов шифрования Present. При правильно угаданном полубайте ключа значение ключа квадрат евклидового расстояния создает значительную аномалию.

Для противодействия атаки дифференциального с внедрением ошибки необходимо использовать S-box разработанный на основе bent-функци [9], [10]:

$$< v_1, v_2 \dots v_n > \; = v_1 \dots v_i \oplus \dots \oplus v_{i-j} \dots v_{i-k},$$

где $v_1,\ v_2 \dots v_n \in F_2^4;\ i,\ j,\ k \in N$.

Условие:

- $\{\mathrm{x} \in \mathrm{F}_2^4 \,|\mathrm{S(x)} + \mathrm{S(x} + \Delta_\mathrm{I}\,)| = \Delta_\mathrm{O}\} \leq 4$
- $\left\{x \in F_2^4,\ y \in F_2^4 \left|(S(x) + S\,(x + \Delta_I\ )) + f(y)_{\Delta_I}\right| = \Delta_O\right\} \leq 4,$

где $f(y)_{\Delta_I}$ – функция ошибки

Первое условие отвечает за устойчивость к ДК. Второе – за устойчивость к ДФА. Оно позволяет функции из безопасного полинома пройдя через преобразования, вызванные внедрением ошибки перейти в такой же безопасный полином.

Алгоритм представлен в виде схемы на рис. 4, но по нему возможно восстановить порядок действия. На рисунке представлена система обнаружения ошибок CED [11]. На вход она получает текстовую информацию состоящий 64 битов. На выходе: шифр текст и сигнал контроля. CED состоит из шифрующего блока, котроллера $G(x)$ и тестера. $G(x)$ – может дублировать шифрующие устройство или содержать любой другой помехоустойчивый код. $G(x)$ и $P(x)$ принимают входной сигнал, преобразовывают его. Сигнал $G(x)$ отправляется в Тестер, Сигнал P(x) отправляется и на тестере, и на выход. В тестере выходные значения контролера и шифрующего устройства сопоставляется и на основании проверки выдается сигнал контроля: $z_1(x)$ если все работает в штатном режиме и $z_2(x)$ если были какие-то ни было нарушения в работе устройства.

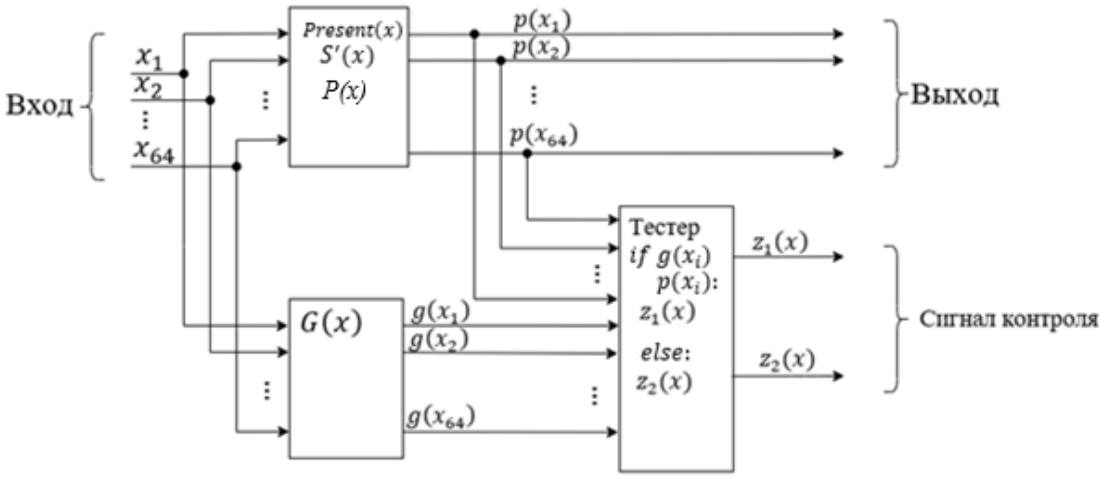


Рис. 4. Система обнаружения ошибок CED

Оценить полученные мной результаты числено довольно сложная задача из-за трудоемкости вычислений. Но если использовать S-box разработанный на основе предложенной bent-функции с условием можно утверждать, что на практике задача злоумышленника сильно усложнится, так как шифр будет устойчив к внедрению простых ошибок и ошибок средней сложности, и ему нужно будет придумывать более сложные модели атаки на шифрующие устройство. А если использовать модификацию в тандеме с системой обнаружения ошибок CED, то вероятность успешной атаки ДК и ДФА стремится к минимуму.

Литература

1. Bogdanov A. [и др.]. PRESENT: An Ultra-Lightweight Block Cipher Lecture Notes in Computer Science / под ред. P. Paillier, I. Verbauwhede, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2007. 450–466 с.
2. Poschmann A. Lightweight Cryptography - Cryptographic Engineering for a Pervasive World. 2009.
3. НОУ ИНТУИТ | Лекция | Введение в основы современных шифров с симметричным ключом [Электронный ресурс]. URL: https://www.intuit.ru/studies/courses/552/408/lecture/9360?page=6#table.7.5 (дата обращения: 02.05.2020).
4. Дифференциальный криптоанализ для чайников [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/215527/ (дата обращения: 13.05.2020).
2. Bogdanov A. [и др.]. PRESENT: An Ultra-Lightweight Block Cipher Lecture Notes in Computer Science / под ред. Paillier P., Verbauwhede I. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2007. 450–466 с.
3. Wang M. Differential Cryptanalysis of PRESENT. 2007.
4. Gu D. [и др.]. Differential Fault Analysis on Lightweight Blockciphers with Statistical Cryptanalysis Techniques 2012. 27–33 с.
5. Wayback Machine [Электронный ресурс]. URL: https://web.archive.org/web/20070615132907/http://www.research.ibm.com/journal/rd/383/coppersmith.pdf (дата обращения: 01.05.2020).
6. Saarinen M.-J.O. Cryptographic Analysis of All 4 x 4 - Bit S-Boxes. 2011.
7. Про ГОСТовский шифр Кузнечик, его SBox и потерянные сиды [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/company/virgilsecurity/blog/453254/ (дата обращения: 02.05.2020).

8. ГОСТ Р 34.12 ─ 2015 Информационная технология КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ Блочные шифры. М.: Стандартинформ. 2015. 25 с.
9. Blondeau C., Nyberg K. Perfect nonlinear functions and cryptography // Finite Fields and Their Applications. 2015. (32). С. 120–147.
10. Токарева Н.Н. Нелинейные булевы функции: бент-функции и их обобщения // Издательство LAP LAMBERT Academic Publishing (Saarbrucken, Germany). 2011. ISBN: 978-3-8433-0904-2. 180 с.
11. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-opasnyh-oshibok-na-rabochih-vyhodah-kombinatsionnyh-logicheskih-shem/viewer (дата обращения: 13.05.2020).

Делец Екатерина Игоревна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы №N3451,
направление подготовки: 10.03.01 – Организация и технология защиты информации,
e-mail: delets.k@gmail.com
Спивак Антон Игоревич
Год рождения: 1982
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: anton.spivak@itmo.ru

УДК 004.492.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕДЕРАТИВНОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е.И. Делец
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.И. Спивак

Аннотация
В рамках работы был разработан метод детектирования сетевых атак, который позволяет получить прирост точности в 3.2% по сравнению с другими методами детектирования сетевых атак, использующих алгоритмы машинного обучения. Были программно реализованы алгоритмы машинного обучения для детектирования сетевых атак, проведен сравнительный анализ и выбор наилучшего алгоритма. Также было программно реализовано федеративное машинное обучение выбранного алгоритма детектирования для двух конечных устройств и проведены сравнительные тесты точности обнаружения сетевых атак.

Ключевые слова
Сетевая атака, бинарная классификация, федеративное машинное обучение, нейронная сеть, информационная безопасность, системы обнаружения вторжений.

Актуальность работы обусловлена увеличением количества сетевых атак за последний год. По статистике компании Positive Technologies, их количество увеличилось на 19% по сравнению с 2018 годом [1]. Новизна данной работы заключается в том, что технология федеративного машинного обучения для задач анализа сетевого трафика и детектирования сетевых атак ранее не применялась. Целью работы является разработка метода, который позволит увеличить точность детектирования сетевых атак, не собирая данные для обучения и тестирования алгоритма машинного обучения в единый центр обработки данных.

Сетевая атака — это осуществляемое дестабилизирующее воздействие на распределенную вычислительную систему, направленное на нарушение конфиденциальности, целостности и (или) доступности информационных ресурсов, осуществляемое программно по каналам связи. Системы обнаружения вторжений (СОВ) являются необходимым элементом защиты от сетевых атак. Основное предназначение подобных систем – выявление фактов неавторизованного доступа в корпоративную сеть и принятие соответствующих мер противодействия.

Методы машинного обучения успешно зарекомендовали себя в СОВ. Система на основе метода машинного обучения обучается на предварительно подобранной выборке, в результате чего учится распознавать определенные классы атак. Важным преимуществом методов на основе машинного обучения при обнаружении атак является их способность обобщать характеристики сетевых атак. В рамках данной работы в терминах машинного обучения детектирование сетевых атак является задачей бинарной классификации, т.к. основной целью системы детектирования сетевых атак является выявление аномалий любого рода, в том числе и ранее не изученных.

Федеративное машинное обучение – это система машинного обучения, в которой множество конечных устройств, называемых “работниками”, совместно обучают модель под управлением центрального сервера, сохраняя при этом данные обучения децентрализованными. Федеративное обучение позволяет снизить многие системные риски и затраты на конфиденциальность в сравнении с традиционными подходами машинного обучения [2]. Стандартные методы машинного обучения требуют, чтобы набор данных для обучения модели был собран в одном месте – на одном компьютере, сервере или в одном дата-центре. Когда данные собраны, начинается обучение модели машинного обучения. В случае федеративного машинного обучения аналогичный процесс производится на некотором количестве конечных устройств, используя уникальные данные каждого устройства.

В данной работе используется набор данных CSE-CIC-IDS 2017 [3], созданный сотрудниками Канадского Института Кибербезопасности. Данный набор данных содержит примеры аномального и нормального трафика. Авторы создали систему из 25 профилей пользователей, передающих данные по протоколам http, https, ftp, ssh и email. Данные собирались в течении пяти дней. Трафик был размечен при помощи pcap-конвертера, написанного на языке программирования Java. В результате исходный набор данных содержит 80 признаков и примеры 15 видов сетевых атак. Топология сети включала в себя 2 сервера, модем, роутер и 12 машин-жертв (Операционные системы Mac OS X, Ubuntu 16.04/12.04, Windows Vista/7/8/10).

Среди методов машинного обучения, показавших высокие результаты в задаче детектирования сетевых атак можно выделить следующие: деревья решений, нейронные сети, байесовские сети и наивный байесовский классификатор, линейная регрессия и метод опорных векторов. Ниже приведена сравнительная таб. 1 данных методов.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов машинного обучения

Метод машинного обучения	F-мера, %	Время обучения, с	Время тестирования, с
Деревья решений	96	18	0.4
Нейронная сеть	97	132	0.6
Метод опорных векторов	76	62	0.5
Байесовская сеть	81	35	1
Линейная регрессия	65	27	0.03

Данная таблица была получена путем реализации вышеуказанных методов на высокоуровневом языке программирования Python версии 3.6. Обработка данных осуществлялась с помощью библиотек Pandas и Numpy, для методы реализовывались с использованием библиотеки Scikit-Learn. Обучающий и тестовый наборы данных были сформированы из набора данных CSE-CIC-IDS 2017. Опираясь на результаты таблицы

1 можно выделить два наиболее эффективных метода: деревья решений и нейронная сеть. Последний метод показал самое большое значение метрики F-мера, поэтому в данной работе будет рассматриваться федеративное обучение нейронной сети.

Согласно исследованию [4], проведенном на наборе данных CSE-CIC-IDS 2017, наибольшую точность имеет глубокая нейронная сеть, состоящая из четырёх скрытых полносвязных слоёв. Первый скрытый слой состоит из 60 нейронов, второй – из 50, третий – из 30, четвертый – из 20. В качестве функции активации используется ReLU (Rectified Linear Unit). В последнем слое функция Softmax присваивает выходам с предыдущих слоев одну из меток: 0 или 1. Для оптимизации процесса обучения используется алгоритм Adam (Adaptive Moment Estimation). Данный алгоритм является комбинацией стохастического градиентного спуска и метода RMSProp (Root Mean Square Propagation). Т.к. данная архитектура глубокой нейронной сети показала наибольшую точность детектирования сетевых атак в рамках исследования сотрудников Стамбульского университета, в данной работе будет использоваться именно эта архитектура.

Федеративное машинное обучение глубокой нейронной сети в данной работе реализовано следующим образом:

1. Сначала конечное устройство получает модель нейронной сети с центрального сервера.

2. Потом осуществляется цикл обучения нейронной сети на уникальных данных конкретного устройства.

3. Затем вычисляется разница в весах до и после обучения, составляется патч.
4. Происходит отправка патча на центральный сервер.

5. На сервере усредняется с другими патчами по алгоритму федеративного усреднения [5].

6. В результате чего формируется и тестируется новая версия модели.

7. Если улучшенная модель показала более высокую точность детектирования, то она отправляется на конечные устройства. Если необходимое значение точности достигнуто, цикл завершает свою работу. В противном случае цикл повторяется вновь (рис. 1).

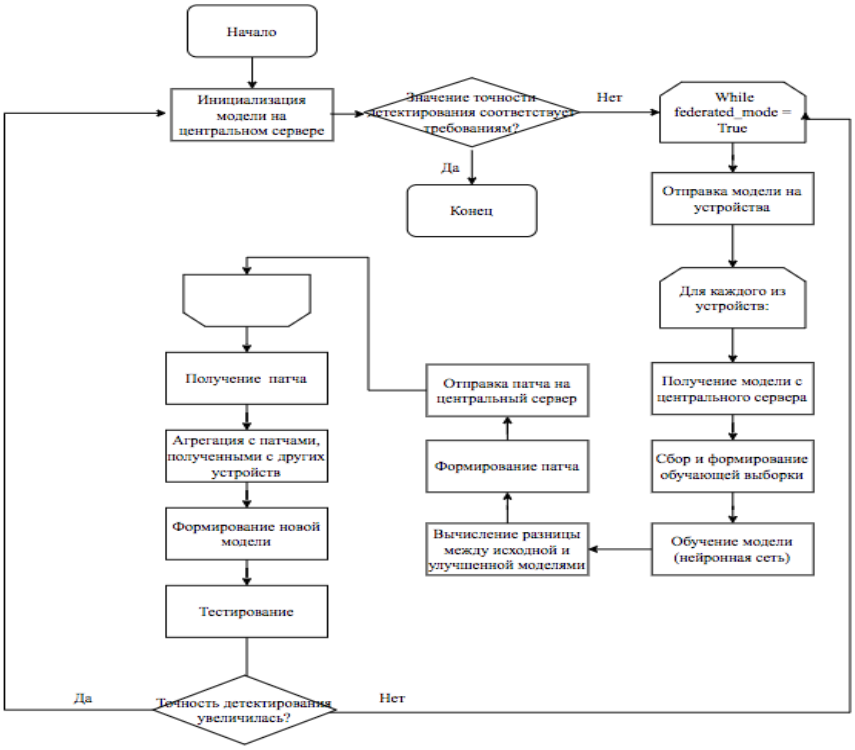


Рис. 1. Схема алгоритма федеративного обучения модели

Исходя из вышеизложенного алгоритма федеративного обучения для решения задачи бинарной классификации можно сформулировать метод детектирования сетевых атак. Информация о сетевом трафике, схожая с той, которая содержится в наборе данных CSE-CIC-IDS2017 подается на вход бинарному классификатору. Данный классификатор получен в результате осуществления нескольких циклов федеративного обучения. В результате, классификатор присваивает трафику метку «1», если на основе полученных данных трафик близок к аномальному. В противном случае, классификатор присваивает метку «0», если трафик является нормальным. В случае получения метки «1». в журнал событий добавляется запись о детектировании сетевой атаки, и системный администратор получает соответствующее оповещение. Схема полученного метода представлена на рис. 2.

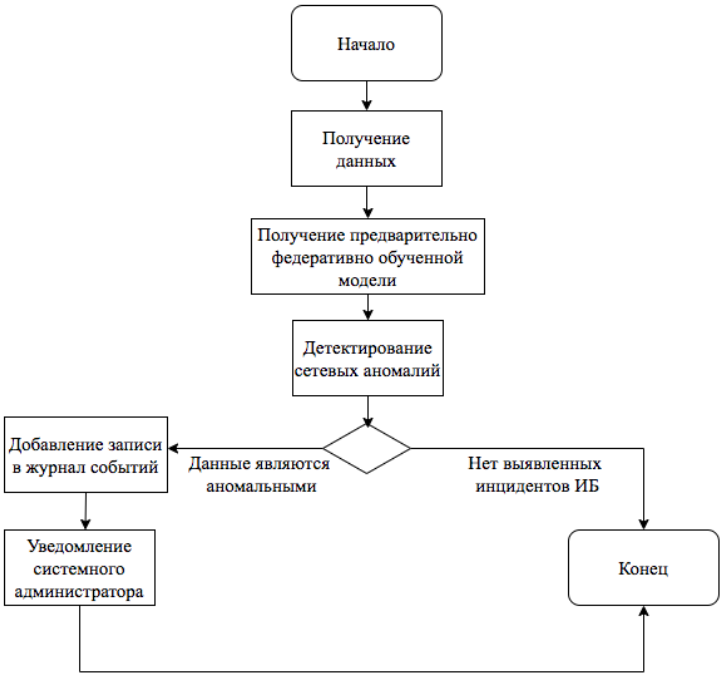


Рис. 2. Схема метода детектирования сетевых атак
с использованием федеративного машинного обучения

Для реализации федеративного обучения глубокой нейронной сети и детектирования сетевых атак был выбран язык программирования Python версии 3.6, фреймворк TensorFlow Federated. В ходе сбора и предобработки данных использовались библиотеки Numpy и Pandas. Для расчета значений F-меры и разбиения выборок на обучающую и тестовую использовалась библиотека Scikit-Learn. Для оценки эффективности детектирования сетевых атак данные из набор данныха CSE-CIC-IDS 2017 было сформировано 5 наборов данных с различными видами сетевых атак. В первый набор вошли атаки типа «Полный перебор», второй – «Отказ в обслуживании», третий – «Распределенный отказ в обслуживании», четвертый – «Межсайтовый скриптинг», пятый – «Ботнет». Далее каждый из наборов был разделен обучающий и тестовый в соответствии с количеством устройств. Обучающая выборка составила 80%, тестовая – 20%. В данной работе значение устройств равно трём: один центральный сервер и два компьютера. В результате было получено 30 различных наборов данных.

Реализованный в данной работе метод стремится улучшить точность детектирования сетевых атак. В данной работе основной метрикой оценки качества детектирования является F-мера. Для получения объективной оценки следует сравнить два метода: традиционный и полученный. Оба метода используют одинаковую

архитектуру глубинной нейронной сети, но по-разному осуществляют процесс обучения. Было проведено 5 экспериментов на пяти различных наборах данных. Это сделано для проверки реалистичности и воспроизводимости разработанного метода. В результате проведения экспериментов были получены результаты, представленные в таб. 2.

Таблица 2

Результаты оценки эффективности традиционного и разработанного методов детектирования сетевых атак

Номер эксперимента	F-мера (традиционный метод), %	F-мера (разработанный метод), %
1. Набор данных с атаками типа «Полный перебор»	88	89
2. Набор данных с атаками типа «Отказ в обслуживании»	89	91
3. Набор данных с атаками типа «Распределенный отказ в обслуживании»	90	92
4. Набор данных с атаками типа «Межсайтовый скриптинг»	85	93
5. Набор данных с атаками типа «Ботнет»	89	92
Среднее значение	88.2	91.4

Таким образом, применение разработанного метода позволило улучшить точность детектирования сетевых атак на 3.2%, что является существенным аргументом в пользу использования данного метода. Разработанный метод позволил улучшить точность детектирования сетевых атак за счет обучения модели на нескольких конечных устройствах под управлением центрального сервера, сохраняя обучающие данные децентрализованными. Данный метод может использоваться для детектирования сетевых атак на конечных устройствах (смартфон, IoT устройства) и в ситуациях, когда сформировать единую обучающую и тестовую выборки не представляется возможным.

Литература

1. Актуальные киберугрозы: итоги 2019 года // Positive Technologies [Электронный ресурс] URL: https://www.ptsecurity.com/ruru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2019/ (дата обращения: 20.03.2020).
2. Bonawitz K. Towards Federated Learning at Scale: System Design. 2016.
3. Intrusion Detection Evaluation Dataset (CSE-CIC-IDS 2017) // Canadian Cybersecurity Institute [Электронный ресурс] URL: https://unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html (дата обращения: 29.03.2020).
4. Ustebay S., Turgut Z. Cyber Attack detection by Using Neural Network Approaches: Shallow Neural Network, Deep Neural Network and Autoencoder. 2019.
5. Konecny J., McMahan H.B. Federated Optimization: Distributed Machine Learning for On-Device Intelligence. 2016.

Елсакова Полина Аркадьевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
студент группы №Т3417,
направление подготовки: 19.03.02 – Продукты питания из растительного сырья,
e-mail: polinaelsakova6@gmail.com
Баланов Петр Евгеньевич
Год рождения: год
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
к.т.н., доцент,
e-mail: balanov@yandex.ru

УДК 663.86.054.1

НАПИТОК НА ОСНОВЕ ФИТОСЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА МИКРООРГАНИЗМОВ

П.А. Елсакова
Научный руководитель – к.т.н., доцент П.Е. Баланов

Работа выполнена в рамках темы НИР №000001 «Технология напитка из фитосырья использованием комплекса микроорганизмов».

Аннотация
В работе рассмотрено применение культуры чайного гриба и различного фитосырья в качестве ингредиентов, способных повысить биологическую ценность напитка, путем увеличения содержания в нем определенных витаминов. Из-за нехватки важных витаминов возникают различные заболевания, поэтому разработка таких функциональных напитков позволит восполнить витаминный запас.
Ключевые слова
Чайный гриб, фитосырье, комбуча, витамины, безалкогольный напиток.

В настоящее время из-за нехватки важных витаминов в организме возникают различные заболевания. Так как человеческий организм не может самостоятельно синтезировать витамины (кроме витамина D, A), одной из наиболее важных проблем в современном мире является поиск источников, богатых именно натуральными витаминами, так как синтетические витамины не приносят должной пользы организму [1, 5].

Одним из таких источников является напиток на основе чайного гриба или, как его еще называют, комбуча.

Ферментация подслащенного сахаром чая с симбиотической культурой чайного гриба дает напиток, называемый комбучей.

Напиток в процессе брожения представляет собой две фракции- жидкий ферментированный чайный субстрат и плавающий на поверхности слой симбиотической культуры [2].

Сама культура чайного гриба представляет собой симбиоз уксуснокислых бактерий и дрожжевых грибов. Это большая колония, по внешнему виду которая напоминает медузу желто-коричневого цвета. Верхняя часть колонии блестящая и достаточно плотная, а нижняя представляет собой ростковую зону с большим количеством свисающих вниз нитей.

Согласно проведенным исследованиям, было установлено, что в ферментативной

жидкости содержатся органические кислоты и витамины, в том числе витамин С и Р, количество которых и определялось в НИР [3].

Определение необходимых показателей производилось в шести образцах:

1) комбуча, ферментированная на черном чае,
2) комбуча, ферментированная на иван-чае,
3) комбуча, ферментированная на чае мате,
4) комбуча, ферментированная на смеси черного чая и мелиссы лекарственной,
5) комбуча, ферментированная на смеси черного чая и шалфея,
6) комбуча, ферментированная на смеси черного чая и мяты перечной.

Все образцы готовились согласно следующей схеме: Подготовленную воду в объеме 2 л для каждого образца довели до кипения, добавили в каждый образец по 8 г высушенных листьев чая. В случае образцов, где использовался черный чай совместно с фитосырьем, добавляли 4 г черного чая и 4 г соответствующего фитосырья. Затем проводили экстракцию в течение 7 минут на водяной бане при температуре 95ºС, после чего удалили все чайные листья путем фильтрации. После чего внесли сахарный песок в количестве 200 г для каждого образца и остудили все образцы до температуры 20ºС.

Затем в каждый образец внесли 15 мл культуральной жидкости, в которой культивировался чайный гриб до этого момента, и сам мицелий чайного гриба. Все банки с образцами накрыли двумя слоями. Готовые образцы поместили в светлое место при комнатной температуре так, чтобы на банки не попадали прямые солнечные лучи [4].

Процесс культивирования проводили на протяжение 14 дней, ежедневно проводя анализы и следя за динамикой нужных показателей. Примерно на 6-9 сутки в образцах начала образовываться тонкая пленка новой культуры чайного гриба, которая становилась толще с каждым днем.

В исследуемых образцах определяли следующие показатели:

- содержание массовой доли сухих веществ;
- общую титруемую кислотность;
- содержание витамина С;
- содержание флавоноидных соединений с Р-витаминной активностью.

О том, как идет процесс брожения мы судили по динамике содержания массовой доли сухих веществ и по содержанию общей титруемой кислотности, что наглядно продемонстрированно на графиках (рис. 1, 2).

Анализируя графики, можно заметить, что лучше и быстрее всего брожение происходило в образце №1, который культивировался на настое черного чая. В образце №3, который культивировался на чае мате, процесс брожения так и не начался на протяжение 14 дней.

Из полученных данных можно сделать вывод, что средой, стимулирующей жизнедеятельность и, соответственно, рост микроорганизмов в чайном грибе, является черный чай, а также среда, состоящая из черного чая и шалфея. Однако среда, состоящая из настоя чая мате, подавляет рост этих микроорганизмов.

Проанализировав данные о содержании сухих веществ и кислотности в получившихся напитках, приступили к анализу содержания витаминов С и Р в этих же напитках, а также нахождению таких образцов, где это содержание будет наиболее высоким и, соответственно, напиток будет обладать более высокой биологической ценностью.

Так как в образце №3 на основе чая мате, брожение так и не началось, то в дальнейших исследованиях на содержания витаминов С и Р в комбуче этот образец мы рассматривать не будем.

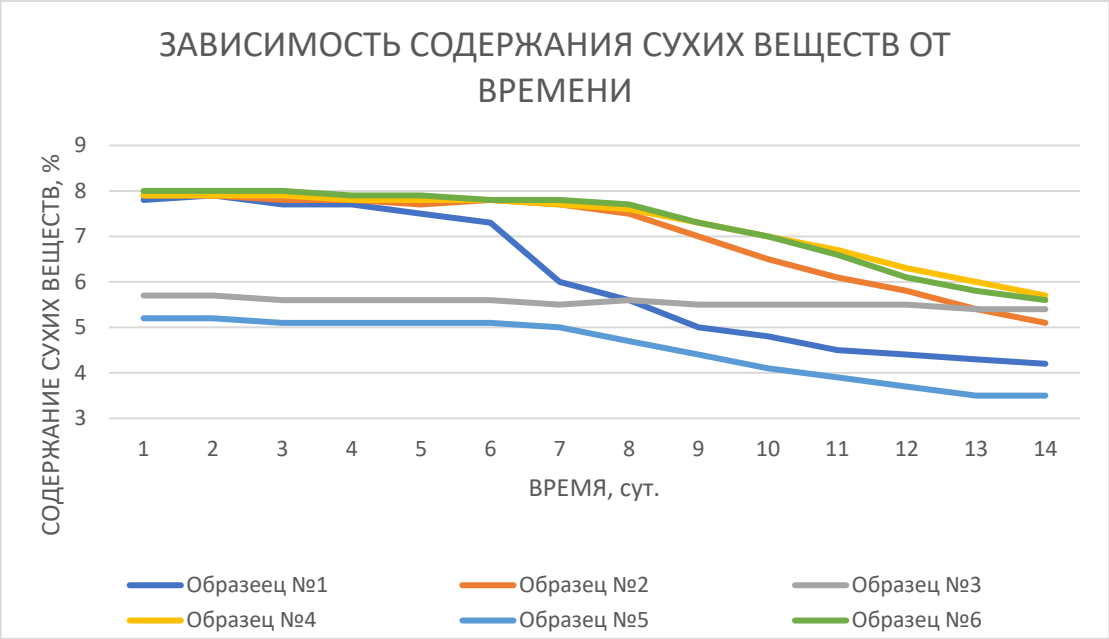


Рис. 1. Зависимость содержания сухих веществ от продолжительности культивирования в различных образцах

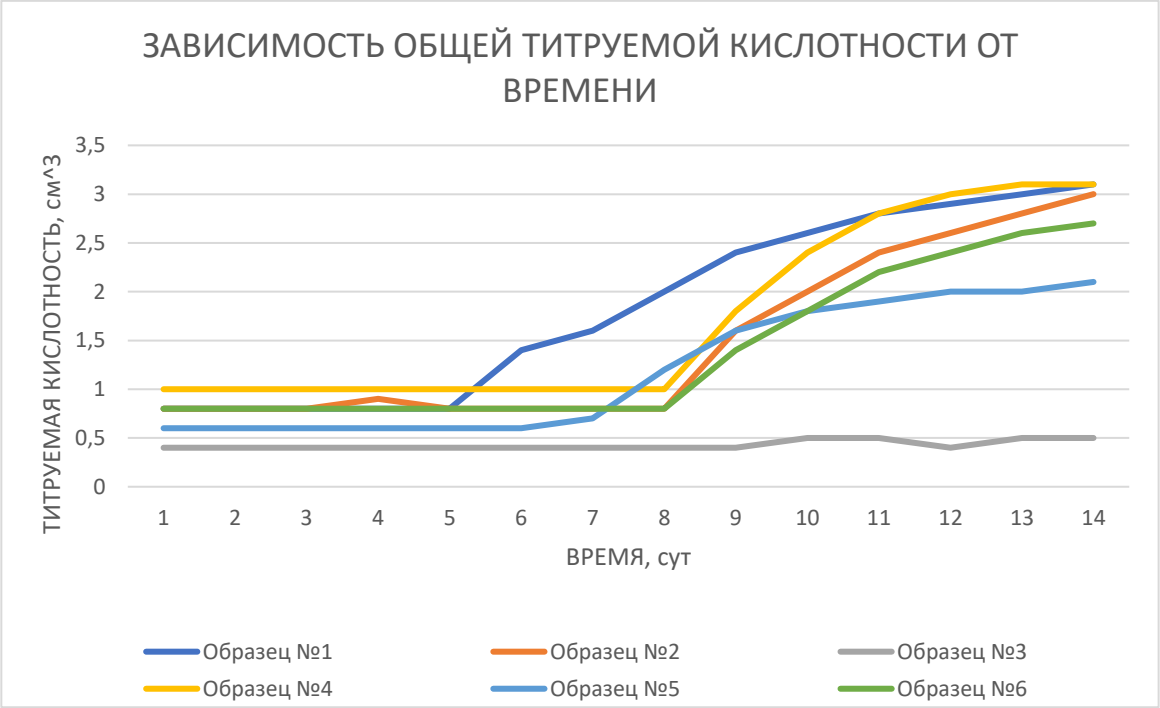


Рис. 2. Зависимость общей титруемой кислотности от продолжительности культивирования

Измерение содержания витаминов проводились в течение 10 дней культивирования.

На рис. 3 представлен график зависимости содержания витамина С от продолжительности культивирования.

На рис. 4 представлен график зависимости содержания витамина Р от продолжительности культивирования.

Анализируя графики, видно, что в образце №4, который культивировался на

настое черного чая и мелиссы лекарственной на 10 сутки произошло наибольшее накопление флавоноидных соединений с Р-витаминной активностью, что составило 25 мг/л.

Также была разработана принципиально-технологическая схема получения напитка из фитосырья с использованием комплекса микроорганизмов (рис. 5).

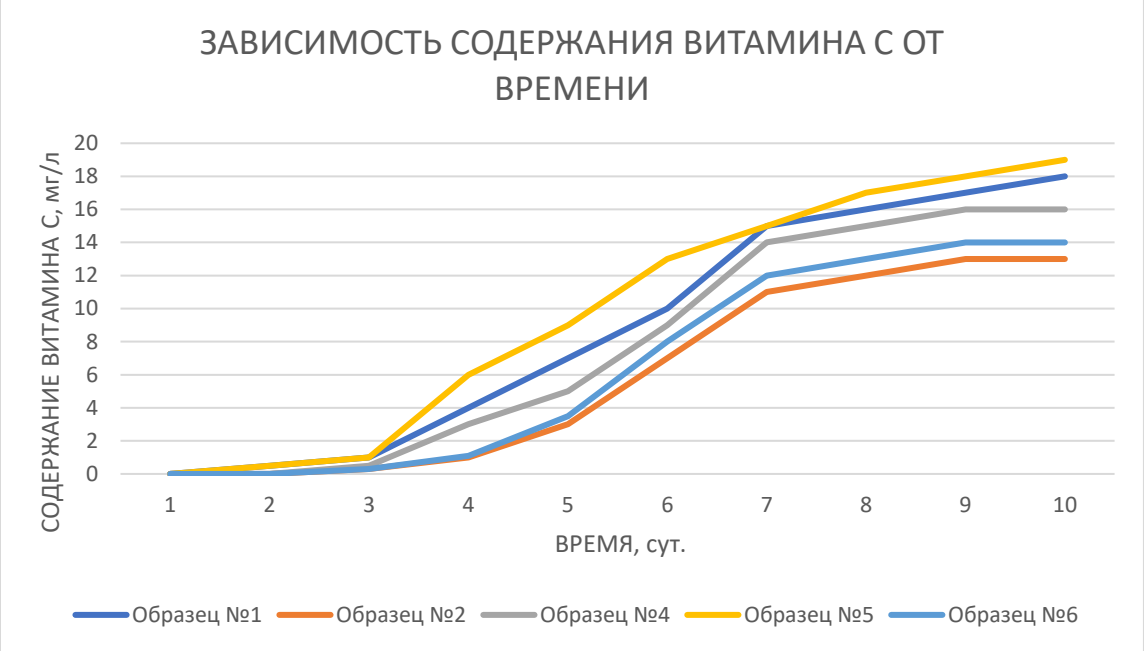


Рис. 3. Зависимость содержания витамина С от продолжительности культивирования во всех образцах

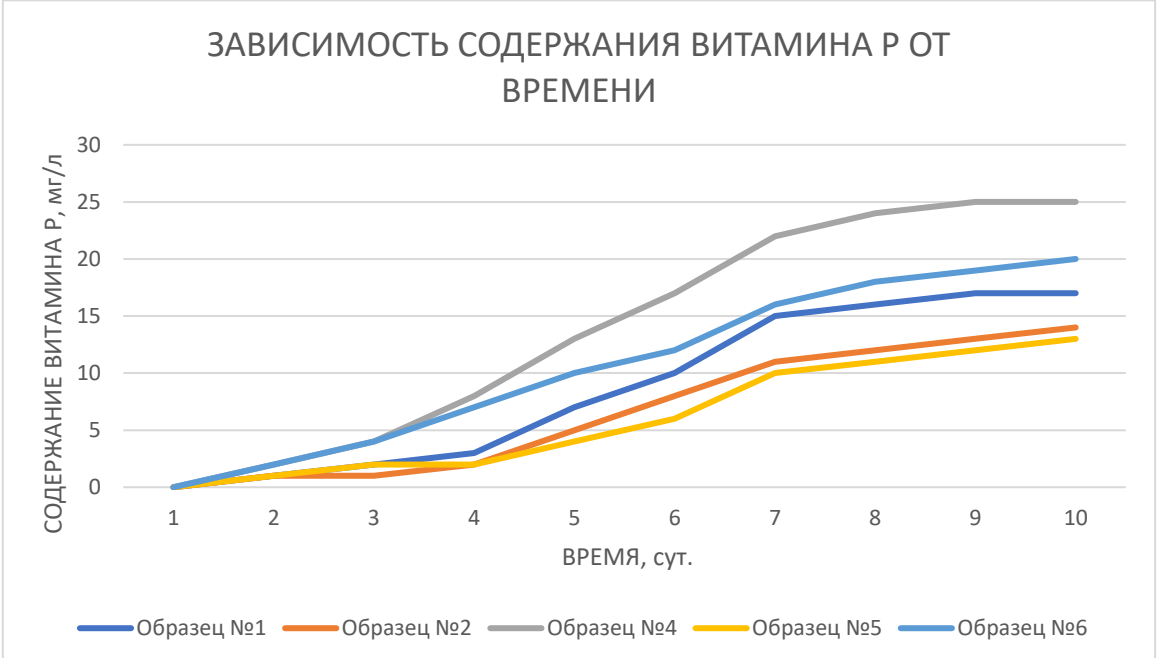


Рис. 4. Зависимость содержания витамина Р от продолжительности культивирования во всех образцах

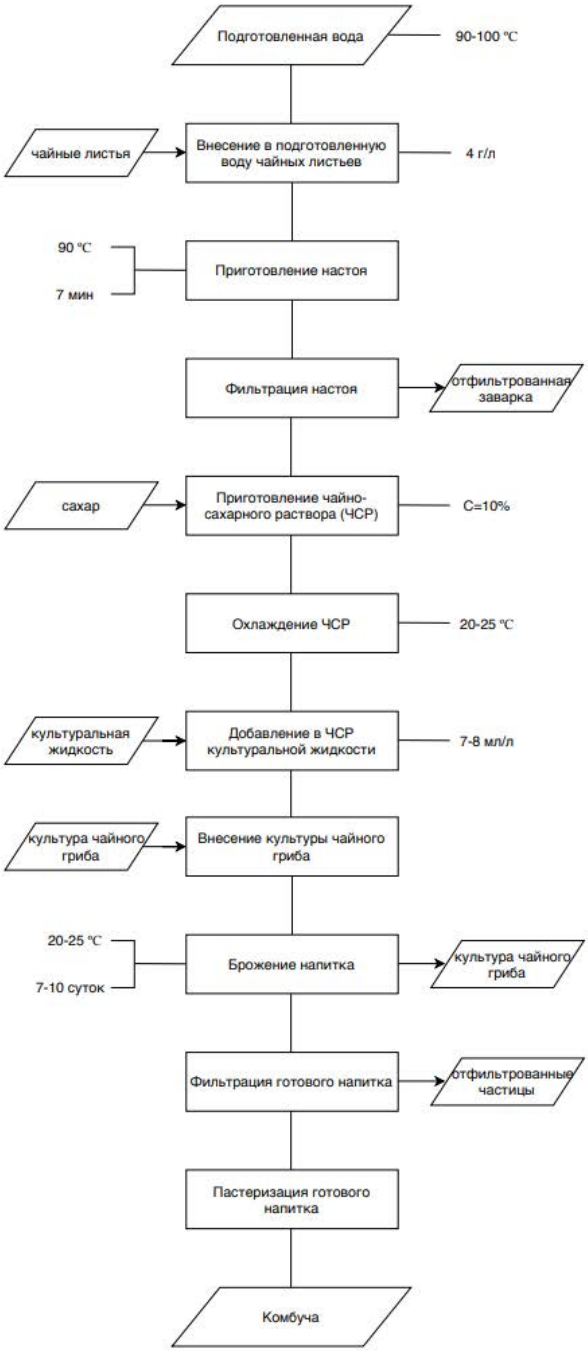


Рис. 5. Принципиально-технологическая схема

1. В ходе выполнения экспериментальной части дипломной работы было установлено, что чай мате в качестве среды для культивирования оказывает ингибирующее действие на рост микроорганизмов в культуре чайного гриба.
2. Наибольшее накопление витамина С произошло в образце, который культивировался на настое черного чая и шалфея. Это значение составило 19 мг/л.
3. Наибольшее накопление флавоноидных соединений с Р-витаминной активностью наблюдалось в образце, который культивировался на настое черного чая и мелиссы лекарственной. Значение этих веществ в напитке составило 25 мг/л.
4. Была разработана принципиально-технологическая схема производства напитка из фитосырья с использованием комплекса микроорганизмов.

Литература

1. Jayabalan Rasu, Malbasa Radomir V., Loncar Eva S., Vitas Jasmina S., Sathish-kumar Muthuswamy A Review on Kombucha Tea – Microbiology, Composition, Fermentation, Beneficial Effects, Toxicity, and Tea Fungus / Comprehensive Re-views in Food Science and Food Safety. 2014. №13. с. 538-550.
2. Malbasa R.V., Loncar E.S., Kolarov LJ. A. Sucrose and Inulin Balance During Tea Fungus Fermentation. / Roum Biotechnol Lett. 2001. №7. с. 573-576.
3. Heck C.I., De Mejia E. G. Yerba Mate Tea: A Comprehensive Review on Chemis-try, Health Implications, and Technological Considerations. / Journal of Food Sci-ence. 2007. с. 72
4. Позняковский В.М., Дроздова Т.М., Влощинский П.Е. Физиология питания: Учебник / Под общ. ред. Поляковского В.М. 4-е изд., испр. и доп. СПб.: Издательство «Лань». 018. 432 с.
5. Трухачев В.И., Стародубцева Г.П., Сычева О.В., Любая С.И., Сухарев Г.А. От проростка до функционального продукта здорового питания: Монография / СПб.: Лань. 2020. 164 с.

Ковалева Дарья Алексеевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
студент группы № Т3417,
направление подготовки: 19.03.02 – Продукты питания из растительного сырья,
e-mail: 79315815212@yandex.ru
Баракова Надежда Васильевна
Год рождения: 1954
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
к.т.н., доцент,
e-mail: barakova@corp.ifmo.ru

УДК 663.12

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОРФОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ДРОЖЖЕЙ

Д.А. Ковалева
Научный руководитель – к.т.н., доцент Н.В. Баракова

Работа выполнена в рамках темы НИР № 617027 «Ресурсосберегающие экологически безопасные биотехнологии функциональных и специализированных продуктов на основе глубокой переработки продовольственного сырья».

Аннотация
В данной работе рассмотрены проблемы оценки жизнеспособности дрожжей на производствах бродильной промышленности. В качестве решения рассмотренных проблем предложено применение технологии компьютерной морфометрии. Было разработано специализированное программное обеспечение, которое автоматически идентифицирует дрожжевые клетки, определяет их тип (живые, мертвые или почкующиеся), а также производит необходимые подсчеты.
Ключевые слова
Жизнеспособность дрожжей, бродильная промышленность, компьютерная морфометрия, программное обеспечение, идентификация клеток.

В настоящее время напитки, производимые на предприятиях бродильной промышленности, являются высоко востребованными по всему миру. Об этом можно судить по количеству употребляемого алкоголя, измеряемого в литрах чистого этилового спирта на душу населения. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) собирает сведения о количестве употребляемого алкоголя в разных странах мира. По последним данным ВОЗ страной с наибольшим потреблением алкоголя стала Эстония – 15,35 литров спирта на душу населения. В России этот показатель составляет 8,42 литра спирта на душу населения [1].

Одним из наиболее важных компонентов при производстве напитков брожения являются дрожжи, продуктом жизнедеятельности которых является этиловый спирт. От качества и жизнеспособности дрожжевых культур зависит качество готовой продукции, а также ее органолептические свойства. Именно поэтому оценка жизнеспособности дрожжей играет важную роль в процессе спиртового брожения [2]. Основными измеряемыми параметрами являются общее количество дрожжевых клеток, а также

количество мертвых и почкующихся клеток [3]. На большинстве предприятий данные измерения микробиологи проводят вручную. Ручной метод определения является достаточно точным, однако требует немало времени и зависит от квалификации работника.

Для решения этой проблемы были созданы специальные приборы – автоматические счетчики клеток, которые обеспечивают высокую точность и быстроту измерений. Главным недостатком автоматических счетчиков клеток является их высокая стоимость. Также они запрограммированы на определенное количество программ, то есть имеют ограниченный функционал [4].

Для того, чтобы обеспечить высокую точность и быстроту измерений, а также снизить финансовые затраты предприятия на покупку оборудования, предлагается применить метод компьютерной морфометрии для оценки жизнеспособности дрожжей.

Компьютерная морфометрия микроорганизмов – это количественная оценка морфологических характеристик микроорганизмов с применением компьютерных программ.

В настоящее время метод компьютерной морфометрии широко используется в медицине, ускоряя и облегчая измерение ряда количественных параметров клеток различных тканей и крови [5].

Метод компьютерной морфометрии основан на цифровой обработке изображений, полученных с помощью микроскопа и подключенной к нему камере. Для обработки изображений необходимо разработать специализированное программное обеспечение, основой для которого является такая математическая модель, как сверточная нейронная сеть. Основными задачами данного программного обеспечения являются: дифференциация клеток (живые, мертвые, почкующиеся) и их подсчет, а также подсчет общего количества клеток.

Этапами разработки программного обеспечения являются: разработка нейронной сети, в которую входят: сбор данных для обучения, обучение, проверка адекватности обучения; разработка пользовательского интерфейса; тестирование программного обеспечения.

Разработка нейронной сети проводилась программистом.

Затем технологом проводился сбор данных для обучения нейронной сети. Для этого было приготовлено несколько образцов зерновой браги с применением дрожжей вида Saccharomyces cerevisiae. В течение всего процесса брожения производились снимки дрожжевых клеток.

Далее проводилось обучение нейронной сети по полученным снимкам. Для этого каждый снимок вручную обрабатывался. На снимке обводились контуры дрожжевых клеток (рис. 1) разными цветами в зависимости от их типа (живые мертвые, почкующиеся).

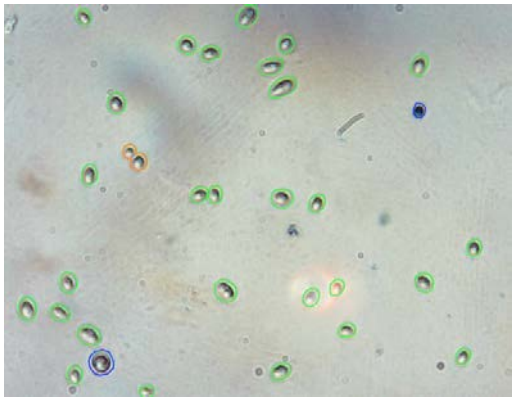


Рис. 1. Пример разметки дрожжевых клеток на снимке

После того, как снимки были обработаны, они загружались в нейронную сеть и проводилось обучение.

После обучения в программу были введены формулы подсчета общего количества клеток, количества мертвых и почкующихся клеток. На фотографии «накладывалась» сетка счетной камеры Горяева и учитывались правила подсчета клеток по ней.

После того, как нейронная сеть обучилась идентифицировать и подсчитывать клетки, был разработан пользовательский интерфейс программы (рис. 2).

Рис. 2. Пользовательский интерфейс программы

Были проведены параллельные измерения нескольких проб: вручную и с помощью разработанной компьютерной программы. В таб. 1, 2, 3 приведены результаты параллельных измерений.

Таблица 1

Сравнительные результаты образца с дрожжами «Thermosacc Dry»

Ручное измерение			Автоматическое измерение		
Общее количество клеток	Количество мертвых клеток	Количество почкующихся клеток	Общее количество клеток	Количество мертвых клеток	Количество почкующихся клеток
15	5	1	16	5	1
12	0	0	11	0	0
6	0	0	7	0	0
8	0	0	7	1	0
5	2	0	6	2	0
Суммарно					
46	7	1	47	8	1
Итог					
1,8 млн.кл/см^3	15,2 %	2,2 %	1,9 млн.кл/см^3	17,0 %	2,1 %

Таблица 2

Сравнительные результаты образца с дрожжами «Fermiol»

Ручное измерение			Автоматическое измерение		
Общее количество клеток	Количество мертвых клеток	Количество почкующихся клеток	Общее количество клеток	Количество мертвых клеток	Количество почкующихся клеток
9	3	2	11	2	4
4	0	2	4	0	2
8	3	4	6	4	4
14	5	0	10	4	0
9	0	2	9	0	2
Суммарно					
44	11	10	40	10	12
Итог					
1,8 млн.кл/см^3	25,0 %	22,7 %	1,6 млн.кл/см^3	25,0 %	30,0 %

Таблица 3

Сравнительные результаты образца с дрожжами «DistilaMax DS»

Ручное измерение			Автоматическое измерение		
Общее количество клеток	Количество мертвых клеток	Количество почкующихся клеток	Общее количество клеток	Количество мертвых клеток	Количество почкующихся клеток
14	2	4	12	1	4
7	0	3	7	0	3
9	0	6	9	0	6
11	0	2	11	0	3
16	1	5	15	1	5
Суммарно					
57	3	20	54	2	21
Итог					
2,3 млн.кл/см^3	5,2 %	35,0 %	2,2 млн.кл/см^3	3,7 %	38,8 %

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что разработанная компьютерная программа способна определять дрожжевые клетки и их тип, а также считать их. Однако, на данный момент точность не соответствует желаемому уровню. Средняя погрешность измерения составляет 13,65 %. Такую высокую погрешность можно объяснить тем, что при обучении было использовано недостаточно входных данных. Данная нейронная сеть обучалась примерно на 400 снимках. Для того, чтобы минимизировать погрешность, необходимо произвести обучение более чем на 2000 снимках.

Таким образом, была разработана и применена компьютерная программа, которая идентифицирует дрожжевые клетки, сегментирует их по типу и подсчитывает. Также можно сказать о том, что метод компьютерной морфометрии для оценки жизнеспособности дрожжей будет востребован на предприятиях бродильной промышленности, а также в ВУЗах во время учебного процесса и выполнения НИР по нескольким причинам:

1. Погрешность измерений будет минимальна по сравнению с погрешностями при

ручных измерениях. Особенно при работе с образцами, где есть клеточные конгломераты.

2. Метод компьютерной морфометрии позволяет снизить трудоемкость и количество затрачиваемого времени на процесс измерения.

3. Метод компьютерной морфометрии значительно дешевле, чем автоматические счетчики клеток, так как основное оборудование в лабораториях на предприятии уже имеется. Необходимо приобрести только камеру и программное обеспечение.

4. Разработанная компьютерная программа предполагает расширение функционала. На данный момент программа способна идентифицировать дрожжи, определять их тип и подсчитывать их. С течением времени могут появляться новые функции, необходимые для анализа дрожжей, например, определение размера дрожжевых клеток, идентификация штаммов дрожжей и др.

Литература

1. Потребление алкоголя. Всемирная организация здравоохранения, 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gateway.euro.who.int/ru/indicators/h2020_5-alcohol-consumption/ (дата обращения: 13.03.2020).
2. Красникова, Л. В. Микробиология: учебное пособие / Красникова Л.В. Санкт-Петербург: Троицкий мост. 2015. 57 с.
3. Меледина Т.В., Давыденко С.Г., Васильева Л.М. Физиологическое состояние дрожжей: Учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ. 2013. 14-19 с.
4. БГА БиоГен-Аналитика. [Электронный источник]. Режим доступа: https://bga.su/?sid=397 (дата обращения: 11.01.2020).
5. Mohammad M.A., Mohammad T.I. Machine learning approach of automatic identification and counting of blood cells // Healthc Technol Let. 2019. № 6(4). P. 103–108.

Красноперова Елизавета Владимировна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
студент группы №P3400,
направление подготовки: 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника,
e-mail: kelizaveta130598@gmail.com
Балакшин Павел Валерьевич
Год рождения: 1984
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
к.т.н., доцент,
e-mail: pvbalakshin@gmail.com

УДК 004.855.5

АНАЛИЗ И ПРЕДСКАЗАНИЕ РЕЙТИНГА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СЕРИАЛОВ

Е.В. Красноперова
Научный руководитель – к.т.н. П.В. Балакшин

Аннотация
В данной работе разработаны нейронные сети для предсказания диапазона рейтинга сериала на 21-й день после его выхода с помощью данных из трекеров сериалов, таких как количество смотрящих, количество комментариев, канал, длительность серии и других. В ходе работы были созданы нейронные сети для бинарной и многоклассовой классификации, обученные на данных с двух ресурсов.
Ключевые слова
нейронные сети, сериалы, предсказание, python, tensorflow.

Введение

Было проведено большое количество исследований на тему предсказания популярности сериалов. Например, работы по изучению влияния присутствия определённых персонажей на рейтинг сериала [1], предсказание, оценки пользователем сериала на основе его предыдущего опыта [2] или предсказание популярности сериала, основанное на упоминаниях в Twitter и иных сайтах, предназначенных для блогов [3].

В отличие от вышеупомянутых исследований в данной работе изучено влияние реакции людей на телешоу в трекере сериалов на рейтинг сериала. В опросе, проведённом перед началом выполнения данной работы, было выявлено, что рейтинг является важной метрикой при выборе нового сериала наряду с мнением друзей о сериале и жанром (рис. 1).

Таким образом, целью данной работы является упрощение процедуры выбора телевизионного сериала для просмотра за счёт предсказания рейтинга с помощью нейронной сети.

Задачами данного исследования являются сбор данных, необходимых для предсказания; приведение полученных данных в формат, подходящий для обучения сети; реализация нескольких типов нейронных сетей; выбор наиболее точной сети и последующее её тестирование.

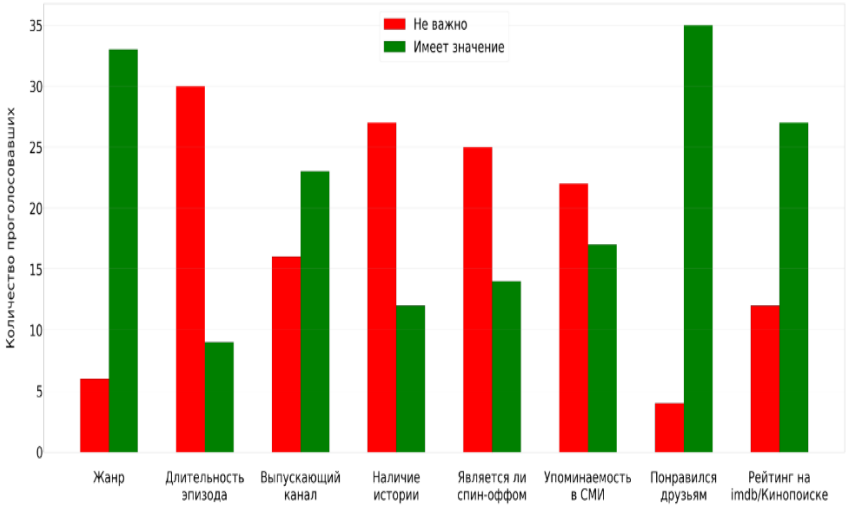


Рис. 1. Факторы, влияющие на выбор нового сериала для просмотра

Обзор предметной области

Для проведения данного исследования необходимы ресурсы, на которых можно получить информацию об активности людей, например, такие данные как: сколько людей собирается посмотреть сериал, как много комментариев оставляют под сериями, была ли у сериала история (связанные книги/сериалы/фильмы). В данной работе для получения вышеуказанных данных использованы следующие ресурсы:

- myshows.me [4] (трекер сериалов, распространённый в СНГ);
- tvtime.com [5] (трекер сериалов, распространённый в Европе и США);
- goodreads.com [6] (сервис для получения информации о книгах и комиксах. Распространён во всём мире);
- imdb.com [7] (сервис для получения информации о фильмах и сериалах. Распространён во всём мире).

Для поиска дат выхода новых сериалов были использованы ресурсы [8-12].

Описание приложения

Работа с сервисами myshows.me и tvtime.com велась через API сервисов. Ежедневно (с 17 января по 8 мая 2020 года) запускался скрипт для получения и сохранения в файл формата csv необходимых данных о сериалах. Данные с сервиса goodreads.com были полученны вручную; данные с сервиса imdb.com были получены с помощью API сервиса myshows.me.

Далее все собранные данные были объединены в общий файл формата csv. После предобработки, в рамках которой из файла был удалён столбец с заголовком, текстовое представление страны было переведено в числовое, а также была проведена нормализация, файл имел двадцать колонок, две из которых являются метками. Подробное описание всех колонок файла представлено в таб. 1.

Поскольку за полгода не удалось собрать достаточно большого числа данных, при построении архитектуры сетей использованы только полносвязные слои. В работе были созданы два разных типа нейронных сетей: одна обладает возможностью предсказывать, выше или ниже отметки 7.0 находится рейтинг, а вторая обладает возможностью предсказывать диапазон рейтинга. Для предсказания диапазона рейтинга на выходе нейронной сети используется функция softmax, а для бинарной классификации – гиперболический тангенс.

Количество слоёв, нейронов и значения гиперпараметров для разработанных нейронных сетей представлены в таб. 2.

Таблица 1

Описание колонок csv файла

Название	Описание данных
country	Идентификатор страны, выпустившей сериал. Целочисленное значение из диапазона [0;11]
genre	Идентификатор жанра сериала. Принимает значение в соответствии с кодом жанра на сайте myshows.me
channel	Идентификатор канала, выпустившего сериал. Принимает значение в соответствии с кодом канала для сайта myshows.me
runtime	Длительность одной серии
has_background	Информация о предыстории сериала. Принимает значение 0 (нет предыстории) или 1 (предыстория есть)
ratung_of_background	Информация о рейтинге предыстории сериала. Имеет значение -1, если предыстории не было и значение рейтинга в диапазоне [0;10], если предыстория была
is_based_on_real_actions	Информация о том, основан ли сериал на реальных событиях. Принимает значение 1, если основан на реальных событиях и 0 в противном случае
count_of_comments_0 … count_of_comments_5	Количество комментариев к сериалу в определённый день
watchers_0 … watchers_5	Количество зрителей сериала в определённый день
binary_label	Предсказываемое поле. Имеет значение 0, если рейтинг сериала на 21-й день меньше 7.0, и 1 в противном случае
multiclass_label	Предсказываемое поле. Имеет целочисленное значение в диапазоне [0;5] в зависимости от рейтинга сериала на 21-й день

Таблица 2

Параметры нейронных сетей

Название ресурса	Бинарная классификация	Многоклассовая классификация
myshows.me	3 скрытых слоя (64, 128, 256 нейронов соответственно) Функция активации скрытых слоёв ReLU Оптимизатор Adam Количество эпох 50	3 скрытых слоя (64, 128, 256 нейронов соответственно) Функция активации скрытых слоёв ReLU Оптимизатор стохастический градиентный спуск Количество эпох 500
tvtime.com	3 скрытых слоя (64, 128, 256 нейронов соответственно) Функция активации скрытых слоёв ReLU Оптимизатор Adam Количество эпох 30	

Результаты обучения разработанных нейронных сетей представлены на рис. 2-5.

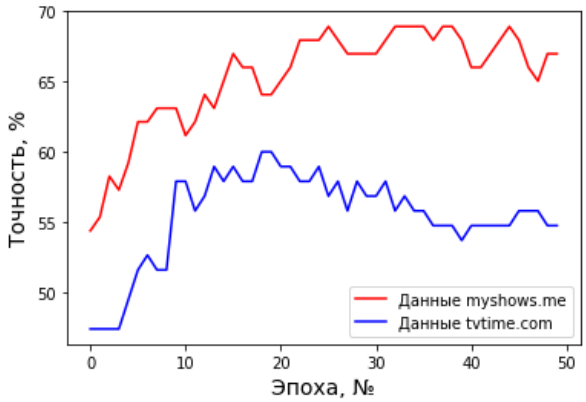


Рис. 2. График точности для нейронной сети для бинарной классификации

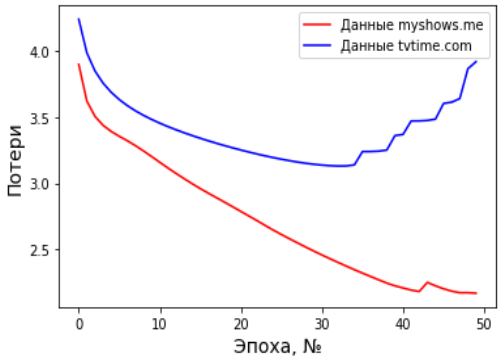


Рис. 3. График потерь для нейронной сети для бинарной классификации

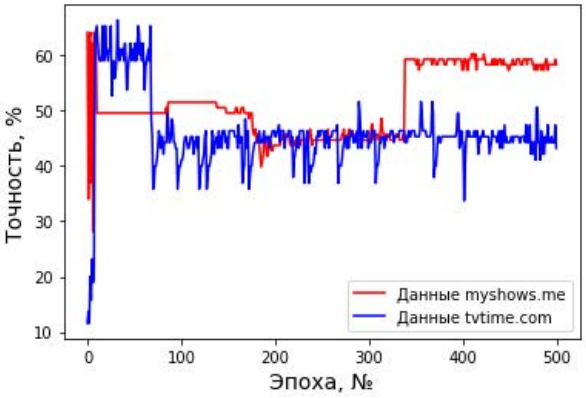


Рис. 4. График точности для нейронной сети для многоклассовой классификации

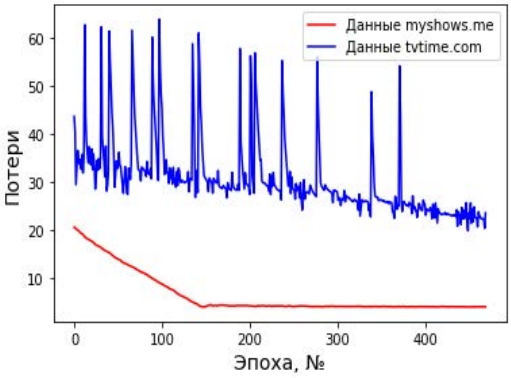


Рис. 5. График потерь для нейронной сети для многоклассовой классификации

Как видно из графиков (рис. 2-5), лучшую точность работы и меньшее значение потерь показала сеть для бинарной классификации, обученная на данных сайта myshows.me. Данная модель была протестирована на реальной задаче, предсказание рейтинга сайта imdb.com на 21-й день после его выхода, и выдала корректный результат в 9 из 11 случаев.

Таблица 3

Сравнение предсказаний нейронной сети с реальными данными

Название сериала	Дата выхода	Результаты предсказания	Реальный рейтинг
Devils	17.04.2020	> 7	6.9
The king: Eternal monarch	17.04.2020	> 7	8.5
#blackAF	17.04.2020	< 7	6.6
The Last Dance	19.04.2020	> 7	9.4
Dummy	20.04.2020	> 7	7.1

продолжение таблицы

Название сериала	Дата выхода	Результаты предсказания	Реальный рейтинг
Code 404	29.04.2020	> 7	6.1
Summertime	29.04.2020	< 7	5.5
Hollywood	01.05.2020	> 7	7.6
Into the night	01.05.2020	> 7	7.1
Betty	01.05.2020	< 7	6.4
Upload	01.05.2020	> 7	8.1

Перспективы

Разработанные модели показали свою работоспособность, однако их точность ещё не достаточна для использования в реальных проектах. В качестве увеличения точности сети необходимо больше обучающих примеров, а также можно добавить анализ следующих данных:

- Комментарии. Под этим подразумевается возможность учитывать позитивный, негативный или нейтральный характер комментариев, таким образом анализируя, как зрители отнеслись к серии. Если большинство комментариев будет негативным, то, скорее всего, рейтинг сериала станет ниже, чем он был до этого.
- Упоминания сериала в средствах массовой информации. При этом учитывать не только количество упоминаний, например, в заголовках статей, но и характер этих статей, чтобы определить позитивно или негативно сериал был встречен критиками.
- Режиссёры, актёры и сценаристы. Некоторые сериалы имеют высокий рейтинг из-за людей, которые их создают, однако не во всех сериалах режиссёры, актёры и сценаристы в разных сериях одни и те же. Данная задача является нетривиальной, так как нужно будет анализировать актёрский и режиссёрский состав для каждой серии.

Кроме того, данная работа может получить развитие на базе одного из трекеров, используемых для получения данных, а именно myshows.me и tvtime.com. Для вышеуказанных ресурсов модель будет полезна, так как она поможет точнее настроить систему рекомендаций, и, следовательно увеличить время пользования приложением и увеличить оценку в магазинах приложений.

Литература

1. Akula, Ramya & Garibay, Ivan. (2019). Forecasting the Success of Television Series using Machine Learning. 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020419. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 332530593_ Forecasting_the_ Success_of_Television_Series_using_Machine_Learning.
2. Sidhu A., Er. Kanwal Preet S. Attwal, Dr. Gupta G. To Evaluate & Predict the Television Serials‟ TRP // International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering (IJERCSE). 2019. №6.
3. Acharya S.S., Gupta A., Shankar P.K.C. TV Show Popularity Analysis using Social Media, Data Mining // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. №8.

4. Рейтинг сериалов: список сериалов на MyShows.me URL: https://myshows.me (дата обращения: 15.01.2020).
5. TV Time | Your TV shows calendar (TVShow Time) URL: https://www.tvtime.com/ (дата обращения: 15.01.2020).
6. Goodreads URL: https://www.goodreads.com/ (дата обращения: 17.01.2020).
7. IMDb: Ratings, Reviews, and Where to Watch the Best Movies & TV Shows URL: https://www.imdb.com/ (дата обращения: 17.01.2020).
8. Календарь премьер сериалов // kino.mail.ru URL: https://kino.mail.ru/series/soon/2020/ (дата обращения: 17.01.2020).
9. График выхода сериалов // film.ru URL: https://www.film.ru/serials/soon (дата обращения: 17.01.2020).
10. 2020 SPRING TV PREMIERE CALENDAR // metacritic.com URL: https://www.metacritic.com/feature/tv-premiere-dates (дата обращения: 17.01.2020).
11. TV PREMIERE DATES 2020 // rottentomatoes.com URL: https://editorial.rottentomatoes.com/article/tv-premiere-dates-2020/ (дата обращения: 17.01.2020).
12. 2020 Winter And Spring TV Schedule: Premiere Dates For Network, Cable And Streaming Shows // cinemablend.com URL: https://www.cinemablend.com/television/2484766/2020-winter-and -spring-tv-schedule-premiere -dates- for-network-cable-and-streaming-shows (дата обращения: 17.01.2020).

Кротиков Григорий Михайлович
Год рождения: 1998 год
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы №N3453,
направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность,
e-mail: gmkrotikov@gmail.com
Кузнецов Александр Юрьевич
Год рождения: 1989 год
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
к.т.н., доцент,
e-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ

Г.М. Кротиков
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.Ю. Кузнецов

Аннотация
В работе рассмотрены особенности иностранных методик тестирования на проникновение, выделены их недостатки. Разработана методика, учитывающая особенности тестирования на проникновение при проведение сертификационных испытаний. Разработанная методика отличается конкретизацией действий каждого этапа тестирования с описанием использования специализированных средств, а также низкими временными затратами при ее использовании, за счет использования автоматизированных средств сканирования.
Ключевые слова
Тестирование на проникновение, методика, пентест, сертификация, сертификационные испытания, методика тестирования на проникновение.

Введение

Согласно новым требованиям по сертификации средств защиты информации, Испытательная лаборатория должна проводить тестирование на проникновение в целях оформления заключения о стойкости объекта оценки к нападениям, выполняемым нарушителем. Тестирование на проникновение предполагает выявление уязвимостей программы путем моделирования (имитации) действий потенциального нарушителя. Процесс тестирования не очень быстрый и трудозатратный, а значит снижение времени, затрачиваемого на тестирование, является актуальной задачей.

Анализ методик тестирования на проникновение

Существует несколько известных общедоступных методологий, которые применяются при тестировании на проникновение. В зависимости от областей тестирования (например тестирование сетей или веб-приложений) или целей тестирования (аудит безопасности или разработка защищенного программного

обеспечения) тестировщиками применяются различные методики и стандарты тестирования. Рассмотрим наиболее популярные: NIST SP 800-115, OSSTMM, ISSAF, PTES, ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045-2013:

1. NIST SP 800-115, создана и поддерживалась иностранным центром NIST (National Institute of Standards and Technology) – Computer Security Resource Center, центром по компьютерной безопасности, объединяющим специалистов федеральных служб, университетов, крупнейших ИТ-компаний США. Данная методика предлагает следующие этапы тестирования на проникновение: планирование, исследование, атака, отчет [1]. В документе сделан упор на структуре тестирования и правилах взаимодействия. Данная методология подготовлена для использования в государственных организациях, однако существенным недостатком ее является то, что методика разработана в 2008 году. Некоторые данные в ней сильно устарели и не обновлялись, а технологии за последние 12 лет сильно изменились. Использование данной методики в настоящее время не представляется возможным. Методика не актуальна.
2. «The Open Source Security Testing Methodology Manual» опубликована в 2008 году ассоциацией ISECOM (Institute for Security and Open Methodologies). Данная методика делает акцент на тестировании безопасности инфраструктуры, но также может использоваться для проведения тестирований на проникновение. Стратегия тестирования на проникновение представлена в четырех фазах: наведения, взаимодействия, расследования и вмешательства [2]. В данной методике отсутствуют описания использования инструментов тестирования. безопасную разработку продуктов, аспекты тестирования расписаны для этапа разработки продукта. Однако элементы, рассматриваемые в данной методике, могут использоваться при проведении сертификационных испытаний, по причине больших возможностей испытательных лабораторий, например наличия исходных текстов программ.
3. Методология ISSAF (Information Systems Security Assessment Framework) была разработана OISSG (Open Information Systems Security Group) в 2006 году. Методика тестирования состоит из трех фаз: планирование и подготовка, тестирование, отчетность и удаление артефактов [3]. Данная методика направлена на комплексное тестирование безопасности систем и обладает большим количеством взаимосвязанных компонентов. Поэтому данную методику сложно спроецировать на стендовое тестирование, которое применяется при сертификации. Также данная методика не учитывает использование исходных текстов, а значит тип тестирования, который применяется в данной методике, черный ящик. Данные аспекты не позволяют полностью применить данную методику при тестировании на проникновение во время проведения сертификационных испытаний.

Методология PTES (Penetration Testing Execution Standard) была создана в 2011 году группой специалистов по информационной безопасности из разных сфер деятельности. Из методологии тестирования можно выделить следующие стадии тестирования на проникновение: подготовка, сбор информации об объекте тестирования, выполнение тестов, отчет [4]. Данная методология построена на организации тестирования по типу черный или серый ящик (в зависимости от условий, на которых договорились стороны тестирования на стадии подготовки). Таким образом использование данной методики целиком при тестировании на проникновение во время проведения сертификационных испытаний не сможет обеспечить достаточно высокий уровень эффективности тестирования, так как, очевидно, не все уязвимостей могут быть обнаружены. Возможность анализировать исходный код программ и программного обеспечения является очень мощным инструментом при поиске уязвимостей.

ГОСТ Р «ИСО/МЭК 18045-2013 Информационная технология (ИТ). Методы и

средства обеспечения безопасности. Методология оценки безопасности информационных технологий». В данном стандарте приводится описание некоторых действий, выполняемых оценщиком при проведении оценки соответствия требованиям защиты информации с использованием критериев и свидетельств оценки, определенных в ИСО/МЭК 15408. В рамках исследования рассматривается только класс доверия AVA: Оценка уязвимостей. Данный вид деятельности предназначен для вынесения заключения о возможности использования недостатков или уязвимостей объекта оценки [5]. На основании анализа свидетельств оценки и поиска оценщиком общедоступных материалов и поддерживается тестированием проникновения. Компонент доверия «AVA_VAN – анализ уязвимостей» занимает весь класс AVA. Данный документ был разработан на основе «Общих критериев», а значит изначально задумывался как составляющая системы сертификации. Профили защиты, организованы из «Общих критериев» и повсеместно ссылаются на данные методические рекомендации при оценке соответствия. В настоящее время ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045 активно используется при проведении анализа уязвимостей в рамках сертификационных испытаний экспертами испытательных лабораторий [6]. Однако, несмотря на популярность, документ имеет ряд значительных недостатков: отсутствует описание использования технических средств тестирования, представляет собой только вектор, который позволит прийти к результату, осуществляя поиск информации ручным путем. Использование данной методики сопряжено с большими временными затратами на тестирование проникновения.

Структура разрабатываемой методики

В результате проведенного анализа уже имеющихся методик, можно говорить о необходимости разработки подробной методики тестирования на проникновение с учетом особенностей сертификации средств защиты информации в России.

Также стоит отметить схожую структуру методик тестирования на проникновение. В общем виде ее можно представить следующим образом:

1. Подготовка. На данном этапе происходит обсуждение основных аспектов тестирования с заказчиком, подписание договоров, определение типов тестирования и уровня подготовки злоумышленника (при имитации действий).
2. Тестирование. На данном этапе происходит тестирование объекта. Для этого проводится сбор информации об объекте, анализ уязвимостей и непосредственно сама попытка эксплуатации обнаруженных уязвимостей.
3. Заключительный этап. Производится анализ выявленных уязвимостей, выявление первопричин, составляются рекомендации по их устранению, производится восстановление системы до начального состояния и подготавливается отчет о проделанной работе.

Однако в структуре методики следует учитывать и особенности процесса сертификации средств защиты информации. Например, фаза подготовки полностью теряет свою актуальность, так как подписание договора осуществляется не только по причине проведения тестирования, а по причине проведения сертификационных испытаний. Обсуждение аспектов тестирования тоже теряют свою актуальность, так как они закреплены на законодательном уровне. Также стоит отметить, что тип тестирования представляет собой белый ящик, так как в распоряжении сотрудников испытательной лаборатории имеется документация и исходные коды изделия. А уровень злоумышленника определяется на уровне требований, выдвигаемых к объекту оценки. При тестировании на проникновение при проведении сертификационных испытаний необходимо учитывать, что отсутствует необходимость в восстановлении системы до начального состояния, а также определять причины выявленных уязвимостей и составлять рекомендации по их устранению.

С учетом описанных выше аспектов структура разрабатываемой методики тестирования на проникновение при проведении сертификационных испытаний на соответствие требованиям по защите информации состоит из следующих этапов:

1. Этап подготовки. Поиск уязвимостей.
2. Этап тестирования. Проведение попыток эксплуатации уязвимостей.
3. Завершающий этап. Формирование отчета о проделанных действиях.

Одним из моментов, на которые сотрудник испытательной лаборатории тратит время, является поиск и подбор необходимых для тестирования программ и средств. Таким образом, определение набора необходимых и минимально достаточных для тестирования средств, позволит ускорить процесс проведения тестирования на проникновение. В рамках работы рассматриваются инструменты, разделенные на три группы, в зависимости от назначения и, как следствие, этапа тестирования: сканеры сервисов и сетей, инструменты для поиска уязвимостей, средства для эксплуатации уязвимостей.

Разработанная методика тестирования на проникновение при проведении сертификационных испытаний средств защиты информации.

На этапе подготовки и поиска уязвимостей должна проводиться настройка согласно документации разработчика. Только так можно будет утверждать о правильной эксплуатации средства. При осуществлении поиска уязвимостей должно производиться внешнее сканирование портов, например, с использование таких утилит как NMAP и hping3. Далее следует выполнить статический анализ исходных текстов программного обеспечения, например, с использованием graudit и AppChecker. Дополнительно специалист лаборатории должен выполнить сканирование с использованием комплексных сканеров уязвимостей, например Сканер-ВС и Nessus. На основании документированного анализа уязвимостей, представленного разработчиком, производится отсеивание закрытых и неактуальных уязвимостей. Результатом действий на данном этапе служит набор потенциальных уязвимостей, подлежащих дальнейшей проверки на эксплуатируетмость.

На этапе тестирования специалисту испытательной лаборатории предлагается выполнить поиск эксплойтов для обнаруженных уязвимостей, например, с использованием Metasploit Framework и Сканер-ВС. А также выполнить обнаруженные эксплойты. В случае отсутствия эксплойта, специалист должен выполнить поиск информации об уязвимости и разработать соответствующий тест на проникновение. После выполнения эксплойтов и разработанных тестов у специалиста должно сформироваться заключение о возможности или невозможности эксплуатации той или иной уязвимости.

Тестирование на проникновение должно завершаться написанием отчета о проведённом тестировании. В отчете должны указываться следующие данные: идентифицированные уязвимости; список потенциальных уязвимостей; усилия, приложенные специалистом лаборатории, для демонстрации общего подхода к тестированию данного средства; конфигурацию тестируемого средства; сведения обо всех пригодных для использования уязвимостях, если таковые имеются. Наличие в отчете этих сведений позволит обеспечить повторяемость результатов тестирования, а также сделать выводы о потенциале нарушителя, имеющего возможность эксплуатировать описанные уязвимости (если таковые имеются).

Сравнительная оценка эффективности разработанной методики

Для оценки эффективности разработанной методики было проведено сравнение с последовательностью действий, описанной в ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045-2013. Данные методические указания являются наиболее распространенными для использования, по причине их ориентированности на процедуру сертификации средств защиты информации в России [6].

Для этого проводилось тестирование шести вычислительных комплексов (ВК). Вычислительные комплексы номер 1, 2 и 3 тестировались с использованием действий описанных в ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045. Остальные три комплекса с использованием разработанной методики.

В ходе исследования для каждой методики оценивались следующие показатели:

– Время, затраченное на тестирование проникновения.
– N – количество обнаруженных потенциальных уязвимостей.
– M – количество пригодных для использования уязвимостей.

Результаты тестирования методик представлены в таблице.

Таблица

Результаты тестирования методик

	ВК1			ВК2			ВК3		
ГОСТ 18045	Время, ч	N, шт	M, шт	Время, ч	N, шт	M, шт	Время, ч	N, шт	M, шт
	22,5	13	0	18,75	13	0	18,0	13	0
	ВК4			ВК5			ВК6		
Разработанная методика	Время, ч	N, шт	M, шт	Время, ч	N, шт	M, шт	Время, ч	N, шт	M, шт
	16,5	35	1	16,0	35	1	16,25	35	1

В процессе тестирования методик было определено, что значительная часть времени тратится на поиск потенциальных уязвимостей. Автоматизация этого этапа, за счет использования специализированных средств позволила ускорить этот процесс. среднее затраченное время при использовании метода, описанного в ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045 составило 19,75ч и разработанной методики 16,25ч.

Выводы

Разработана методика тестирования на проникновение, которая может использоваться при проведении сертификационных испытаний средств защиты информации на соответствие требованиям по защите информации.

Оценка эффективности разработанной методики, проведенная в ходе настоящего исследования, показала сокращение времени, затрачиваемого на тестирование проникновения на 17,7%.

Литература

1. Technical Guide to Information Security Testing and Assessment [Электронный ресурс] URL: http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-115/SP800-115.pdf, режим доступа: свободный, дата обращения: 15.03.2020.
2. OSSTMM [Электронный ресурс] URL: https://www.isecom.org/OSSTMM.3.pdf, режим доступа: свободный, дата обращения: 15.03.2020.
3. ISSAF [Электронный ресурс] URL: http://cuchillac.net/archivos/ pre_seguridad_pymes/2_hakeo_etico/ lects/metodologia_oissg.pdf. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 15.03.2020.
4. Богораз А.Г., Пескова О.Ю. Методика тестирования и оценки межсетевых экранов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №12 (149). С.148-156.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Методологии оценки безопасности информационных технологий. Введен 01.07.2013. М.: Стандартинформ. 2014. 243 с.

6. Марков А.С., Цирлов В.Л., Барабанов А.В. Методы оценки несоответствия средств защиты информации. Москва. Радио и связь. 2012 г. 192 с.

Кущенко Ольга Михайловна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика,
e-mail: kuschenko_olga@mail.ru
Рождественский Юрий Владимирович
Год рождения: 1958
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
д.ф-м.н. профессор,
e-mail: rozd-yu@mail.ru

УДК 53.043

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ФРАКТАЛЬНЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМООРГАНИЗОВАННЫХ ДЕНДРИТНЫХ СТРУКТУР CdTe КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

О.М. Кущенко
Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Ю.В. Рождественский

Аннотация
В настоящей работе рассмотрены фрактальные свойства дендритных структур, полученных методом самоорганизации CdTe квантовых точек. Были исследованы спектральные характеристики дендритов, продемонстрировано смещение положения пика люминесценции в различных областях ветвей дендритной структуры. Предложен метод расчёта фрактальной размерности заданной области дендрита. Вычисление размерности Минковского для заданных областей показало существование корреляции полученного численного значения с положением пика люминесценции.

Ключевые слова
Фрактальная размерность, дендриты, квантовые точки, CdTe, гетероструктуры, размерность Минковского.

Введение

Исследование технологий получения синтетических «умных материалов» получило широкое развитие в конце 20 века [1]. В частности, основанные на двумерных аллотропных модификациях углерода материалы привлекают внимание исследователей из различных областей науки и промышленности. Настоящий интерес вызван потенциально широкой областью применений таких материалов от плазмоники до использования в качестве альтернативой основы для наноразмерных гетероструктурных транзисторов. Исследования по изучению графена удостоились Нобелевской премии 2010 года.

Умные материалы, такие как графен, обладают регулярной упорядоченной структурой, которая обеспечивает необходимые функциональные свойства. В то же время, существуют упорядоченные самоподобные структуры, к которым относятся дендриты. Такие структуры, в отличие от пространственно регулярных материалов, характеризуются дробными значениями фрактальной размерности, а не целочисленными. Такое отличие существенным образом сказывается на свойствах умных материалов. Несмотря на некоторые сложности, связанные с изучением

самоподобных структур (такие как затруднительная воспроизводимость), они обладают пространственной неоднородностью физических свойств. Это означает возможность регулирования свойств путем изменения области или масштаба рассмотрения структуры. Данный аспект кардинально отличает материалы с дробной фрактальной размерностью от "классических" и открывает возможности для потенциальных применений дендритных структур.

На сегодняшний день материалы с дробной фрактальной размерностью представлены дендритными гетероструктурами, получаемыми в процессе самоорганизации квантовых точек [2]. Сегодня дендриты из квантовых точек изучаются только с точки зрения спектроскопии, в то время как, ввиду ветвящейся структуры, имеет смысл изучить их структурные свойства, такие как фрактальная размерность. Известно, что дендрит при самоорганизации квантовых точек образуют лиганды, присутствующие в коллоидном растворе, а квантовые точки встраиваются в него как в матрицу. Из этого следует вывод, что должна быть корреляция между структурой дендрита и распределением квантовых точек в нем. В настоящей работе представлено исследование связи топологических характеристик дендритной структуры, таких как фрактальная размерность подложки, и спектральных характеристик CdTe квантовых точек.

Спектральные характеристики дендритов

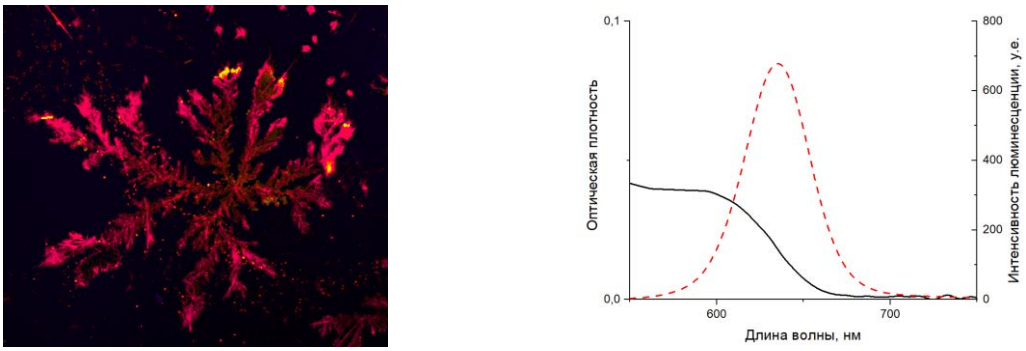
Дендритные структуры представляют собой однородные фрактальные образования, встречающиеся в природе. В то же время гетероструктурные дендриты, полученные в результате осаждения из раствора, обладают гораздо более сложной структурой. Упрощенную модель роста можно описать двухкомпонентной моделью: дендритной матрицей, рост которой описывается диффузионной моделью, и конгломератов квантовых точек, заполняющих пространство, ограниченное матрицей. Для экспериментальной реализации модели исследовались дендритные структуры, полученные из растворов CdTe квантовых точек.

Дендритные структуры выращивались путем нанесения капли коллоидного раствора CdTe квантовых точек объемом 8 мкл на предметное стекло, которое помещалось в эксикатор. В зависимости от солюбилизатора и кислотности раствора, а также от условий высыхания, полученные дендриты имеют различную структуру. Дендриты, полученные из квантовых точек с лигандами 3–меркаптопропионовой кислоты меньше в диаметре, и могут быть с большой точностью вписаны в окружность. Дендриты, полученные из квантовых точек, солюбилизированных тиогликолевой кислотой, имеют более сложную форму, различную для каждого дендрита. Значительную роль в формировании формы и количества дендритов в образце играет кислотность раствора (значение pH) – в образцах с большими значениями pH плотность расположения дендритов значительно выше, чем в образцах с меньшей кислотностью. Также, дендриты, выращенные в более щелочной среде, имеют более четкий контур в проходящем свете, из чего был сделан вывод о роли щелочи в формировании дендритов. Кроме того, в ходе данного исследования были синтезированы дендриты, высыхание которых производилось при температуре 2∘C. Полученные дендриты обладают нечеткой формой, в связи с чем не были изучены в данной работе (из-за невозможности корректного определения фрактальной размерности полученных структур).

Помимо отличий, у выращенных в ходе данной работы дендритов есть общие черты. Так, все полученные дендриты характеризуются большими размерами – от 100 мкм в диаметре. У структур нет ярко выраженного ядра (в отличие от дендритов, описанных в работе [2]). Во всех полученных дендритах наблюдается пространственная неоднородность спектра люминесценции (сдвиг до 15 нм). Все

локальные пики люминесценции ложатся в огибающую спектра люминесценции раствора квантовых точек, что говорит о том, что вклад в люминесценцию дают именно они.

В данной работе анализировались дендриты, полученные из раствора CdTe квантовых точек, солюбилизированных тиогликолевой кислотой. Кислотность раствора составила pH = 11,5, концентрация квантовых точек 5 мкМ, высушивание производилось при температуре 23∘C. Данные параметры были выбраны как оптимальные с точки зрения корректного определения фрактальной размерности (контур дендрита достаточно четкий) и длины волны максимума локальных спектров люминесценции (высокое соотношение сигнала к шуму в спектре). Полученные в результате контролируемого высыхания структуры изучались с помощью конфокального сканирующего микроскопа LSM 710 (Zeiss, Германия). Для регистрации люминесценции использовался лазер с длиной волны 405 нм. Характерная дендритная структура, полученная из раствора с данными условиями, представлена на рис. 1а.



а б

Рис. 1. (а) Люминесцентное изображение дендритной структуры, полученной в результате контролируемого высушивания раствора CdTe квантовых точек. Концентрация квантовых точек в растворе C = 5 мкМ, кислотность раствора pH = 11.5, испарение производилось при температуре T = 23◦C. (б) Спектры люминесценции (пунктирная кривая) и пропускания (сплошная кривая) раствора квантовых точек CdTe

На рис. 1б представлены спектры пропускания и люминесценции раствора CdTe квантовых точек. Средний размер ядер квантовых точек был рассчитан по положению максимума длинноволновой полосы поглощения [3] и составил 3,6 нм. Максимум люминесценции раствора соответствует длине волны 635 нм. Спектры поглощения раствора квантовых точек были получены при помощи спектрофотометра UV3600 (Shimadzu, Япония), спектры люминесценции изучались на спектрофлуориметре Cary Eclipse (Varian, Australia).

Расчет фрактальной размерности дендритных структур

До сих пор мы говорили о спектральных характеристиках. В то же время, существует топологическая характеристика, характеризующая полученную структуру как дендрит – фрактальная размерность. Классический дендрит, как и всякая самоподобная структура, характеризуется дробной фрактальной размерностью.

Для расчёта фрактальной размерности дендрита, представленного на рис. 1, был использован метод box-counting, описанный в [4]. Пусть M – количество равных квадратных частей, на которые делится исходное координатное пространство. Для размера квадрата ϵ необходимо конечное число элементов $N(\epsilon)$ для всюду плотного заполнения контура дендрита. Очевидно, что достаточно одного квадрата 800x800px для того, чтобы полностью заполнить исходный дендритный контур (рисунок 2). С

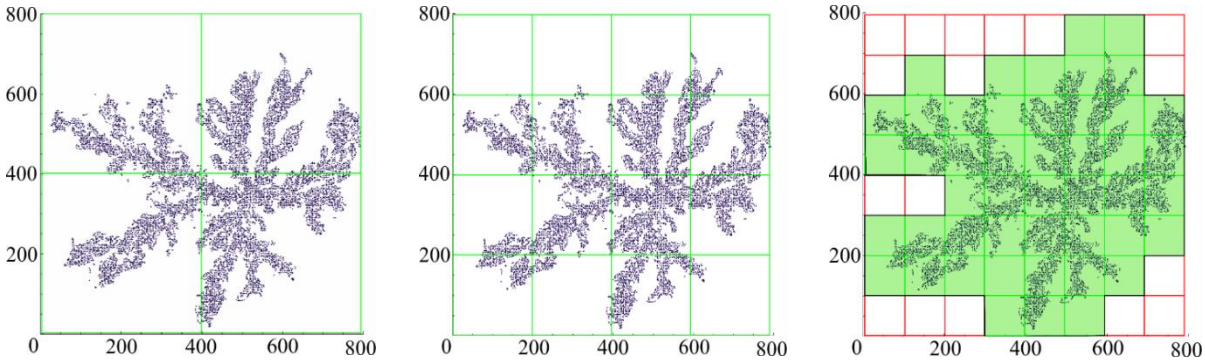
каждым шагом будем уменьшать размер квадратов в $1/k$ раз. На рис. 2б, в качестве примера коэффициент уменьшения k = 0,5. Уменьшение характерного размера ϵ приводит к увеличению числа элементов, необходимых для заполнения контура дендрита (рис. 2в). Фрактальная размерность контура определяется величиной [4].

$$D = \lim_{\epsilon \to 0} -\frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \epsilon}, \tag{1}$$

где $N(\epsilon)$ – множество клеток размером ϵ, необходимых для заполнения контура. Для соседних значений ϵ и $k\epsilon$, дифференциальное значение $D(k)$ определяется тангенсом наклона прямой вида

$$\ln N(\epsilon) - \ln N(k\epsilon) = -D(k)(\ln \epsilon - \ln(k\epsilon)). \tag{2}$$

Таким образом, значение фрактальной размерности производится линейной аппроксимацией графика $\ln N(\epsilon_k)$ $[-\ln \epsilon_k]$.



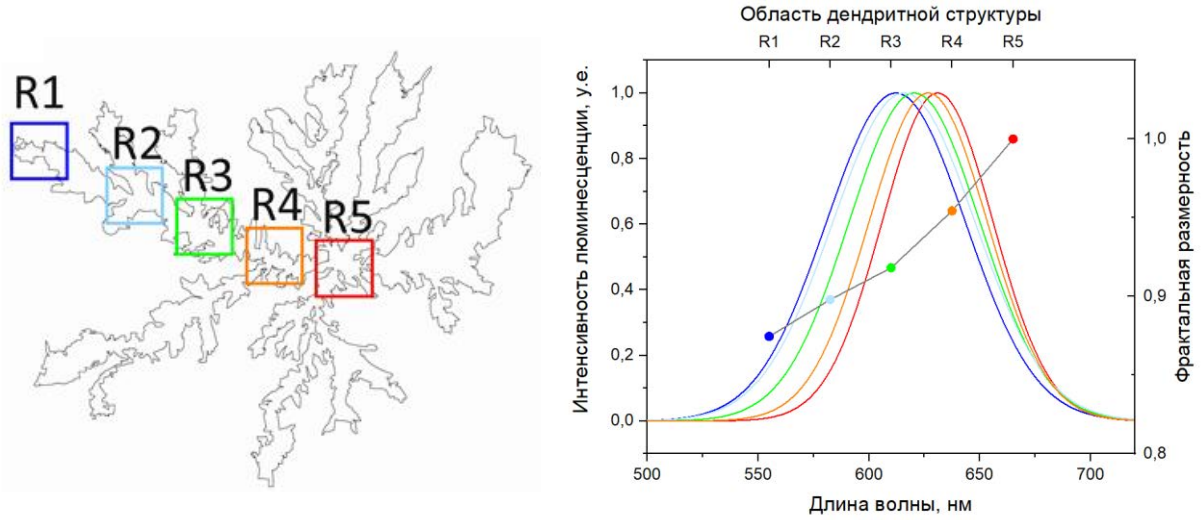
а б в

Рис. 2. Процесс расчёта фрактальной размерности дендрита методом box-counting. Продемонстрировано заполнение характерным размером ϵ при k = 0,5, ϵ_0 = 400 px

Как может быть видно из уравнения (2), размерность Минковского определяется коэффициентом наклона кривой на линейном участке. Возможная нелинейная зависимость при определении фрактальной размерности может быть обусловлена конечностью элементов контура в дискретной модели. В определенный момент при уменьшении ϵ в каждой клетке будет присутствовать либо одна, либо ноль точек дискретного контура. Таким образом, при уменьшении ϵ, общее число клеток, участвующих в заполнении, становится постоянным.

Предложенный метод демонстрирует расчёт фрактальной размерности контура дендритной структуры в целом. Так, идеальные фракталы обладают единым значением фрактальной размерности, независимо от рассматриваемой области [5]. Однако в силу внешних причин (флуктуаций температуры, изменяющейся скорости осаждения и роста), формирование дендрита осуществляется неравномерно. Неравномерный рост приводит к неоднородной плотности самоподобия, и как следствие, различному значению фрактальной размерности в различных областях пространства. На рис. 3б точками представлены значения локальной фрактальной размерности, рассчитанные в квадратных областях $R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$, обозначенных на рис. 3а. Гауссовыми кривыми обозначены соответствующие нормированные спектры люминесценции. Можно видеть, что значение фрактальной размерности различно в разных областях пространства дендрита. С приближением к центру роста происходит увеличение фрактальной размерности D = 1.23 → 1.45 (0.85 → 1 в нормированных обозначениях),

причём увеличение плотности самоподобия коррелирует со смещением пика люминесценции в длинноволновую область (612 → 626 нм).



а б

Рис. 3. (а) Области дендритной структуры, изучаемые в ходе исследования. (б) Нормированные спектры люминесценции и нормированные значение фрактальной размерности областей, указанных на рисунке (а)

Таким образом, дендритная структура, образованная раствором CdTe квантовых точек, демонстрирует мультифрактальные свойства. Система обладает не дискретным набором характерных фрактальных размерностей, проявляющихся на разном масштабе измерения, как это свойственно динамическим моделям, а непрерывным спектром с увеличением D от периферии к центру роста. Поскольку спектры люминесценции образованы излучением не самой дендритной матрицы, а квантовых точек, находящихся в вакансиях, мы наблюдаем связь плотности самоподобия подложки с квантово-размерными эффектами. Математическая модель диффузного роста матрицы с динамическими граничными условиями, определяющими неравномерность роста, будет рассмотрена в дальнейших исследованиях.

Литература

1. Smith R.C. Smart material systems: model development. – Society for Industrial and Applied Mathematics. 2005. 501 p.
2. Adrianov V.E. et al. Spectral study of the self-organization of quantum dots during the evaporation of colloidal solutions // Journal of Optical Technology. 2011. V. 78. №. 11. P. 699–705.
3. Yu W.W. et al. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals // Chemistry of Materials. 2003. V. 15. № 14. P. 2854–2860.
4. Rudyi S.S., Vovk T.A., Rozhdestvensky Y.V. Signature identification by Minkowski dimension // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2019. V. 29. № 5. P. 053110.
5. Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. Оптические свойства фрактальных нанодендритов в процессах их самоорганизации // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. №. 3.

Лекшин Павел Александрович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
студент группы №R3425,
направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника,
e-mail: pavellekshin@mail.ru
Коваленко Павел Павлович
Год рождения: 1984
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
к.т.н., доцент,
e-mail: ppkovalenko@itmo.ru

УДК 555.32

РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ УМНОГО ДОМА

П.А. Лекшин
Научный руководитель – к.т.н., доцент П.П. Коваленко

Аннотация
Обзор разработанных модулей умного дома для автоматизации систем водоснабжения, отопления, освещения и умной теплицы.

Ключевые слова
Умный дом, автоматизация, программно-аппаратный комплекс, модули.

Введение

Умный дом – это программно-аппаратный комплекс для домашней автоматизации, призванный минимизировать участие человека в выполнении рутинных задач. Типичное устройство умного дома включает в себя датчики, актуаторы, контроллер или сервер и систему коммутации [1].

Сейчас в создании умных домов можно выделить два основных подхода к задачам и соответственно построению систем домашней автоматизации.

Первый подход заключается в упоре на установку систем обеспечения безопасности, таких как датчики газа, огня, протечек, проникновения. Актуаторы в данном подходе, в основном, это запорные системы и системы оповещения. Целью данного подхода является информирования пользователя о чрезвычайной ситуации и попытка её предотвращения. Первый подход больше распространён в России.

Второй подход заключается в упоре на создание комфортных условий для человека. Здесь в основном используются датчики, контролирующие среду обитания человека, такие как температура и влажность воздуха, освещённость и другие. Актуаторами здесь могут быть практически все элементы - начиная от розеток и штор и заканчивая сложными бытовыми приборами. Так же часто в этом подходе происходит подключения бытовых прибор к «единому пульту» для удобства управления ими. Второй подход больше распространён на Западе.

Общей чертой любого подхода к построению умного дом является написание алгоритмов и сценариев поведения отдельных приборов или групп приборов, привязанных к показаниям датчиков или произошедшему событию.

Сервер и коммутация

При построении умного дома чаще всего используется клиенто-сервеная модель. Также для стабильной работы систем умного дома важно создание качественного канала связи датчиков и исполнительных устройств с сервером. Для обмена данными были выбраны проводная сеть на основе протокола TCP-IP и беспроводная по технологии WI-FI для обеспечения простоты монтажа и взаимозаменяемости компонентов и узлов системы.

Анализ и выбор коммутационного оборудования

Для создания высококачественной проводной и беспроводной сетей необходимо были выбраны интернет-центры марки Keenetic 3 поколения и коммутаторы фирмы D-Link. Были использованы интернет-центы Keenetic OMNI и Keenetic LITE, в которых реализованы функции создания MESH сети и управления всеми интернет-центрами из одной точки управления, что очень сильно упрощает развёртывания и обслуживание сети. А при установке систем в загородном доме или квартире большой площади для корректной работы умного дома важно качество покрытия, а соответственно и количество точек доступа.

Для подключения системы к глобальной сети интернет может быть использована проводная, спутниковая или мобильная связь. Так как система умного дома часто используется в загородных домах оптимальным решением будет использование мобильной связи, для чего в системе устанавливаются интернет-центр Keenetic с поддержкой USB модемов и USB модем фирмы Huawei.

Анализ и выбор серверной платформы

Основными требованиями к серверу умного дома являются высокие вычислительные мощности, малые габариты, низкий уровень шума и малая стоимость. Серверами умного дома чаще всего выступают персональные компьютеры, одноплатные компьютеры и микроконтроллер Arduino MEGA. Самым оптимальным вариантов для сервера умного дома является использование одноплатного компьютера. Далее рассмотрим три самых популярных одноплатных компьютера представленных на Российском рынке (таблица).

Таблица

Сравнение характеристик одноплатных компьютеров

Характеристика	Raspberry Pi 3B+	Banana Pi M3	Asus Tinker board S
Процессор	ARM Cortex-A53	ARM Cortex-A7	ARM Cortex-A53
Ядра	4	8	4
Частота	1.4 ГГц	1.8 ГГц	1.8 ГГц
ОЗУ	1 Гб	2Гб	2Гб
Цена	35$	68$	92$

Исходя из характеристик, приведённых в таблице оптимальным для создания сервера умного дома, был выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 B+. Данная платформа является одним из лучших решений для создания сервера умного дома. В следствии не высокой цены, низкого энергопотребления, малых габаритов, но высокой производительности и надёжности.

В качестве платформы для разработки программных средств был выбран проект с открытым исходными кодом MajorDoMo [2]. Данная система кроссплатформенная и не

требовательная к ресурсам вычислительного устройства. Плюсами использования данного программного обеспечения является его модульность, гибкость, открытость, простота интерфейсов настройки, большое количество поддерживаемых протоколов и систем сторонних производителей. Для оповещений пользователя о происходящих событиях используется модуль для создания Telegram бота. Также большим плюсом является адаптированность программного обеспечения для работы с одноплатным компьютером Raspberry Pi 3 [3-5].

Модуль управления водоснабжением дома

Основной задачей модуля является контроль объёма воды, находящейся в баках, и автоматическое пополнение их из скважины, установленной на участке. Для реализации данного модуля было разработано два узла. Узел контроллера бака и узел контроллера насоса с блоком клапанов.

Контроллер бака

Контроллеры бака состоят из мерной линейки и микроконтроллера, считывающего показания с линейки и передающего их на сервер через локальную сеть.

Контроллеры могут быть выполнены на трёх платформах, а именно Arduino NANO + ENC28J60, Arduino MEGA + W5100 и ESP-12E NodeMCU. Вне зависимости от исполнения контроллера его функциями являются ожидание срабатывания датчика на мерной линейке, его преобразования относительно геометрии бака и передачи процентного значения на сервер.

Мерные линейки также могут быть выполнены в двух различных видах цифровом и аналоговом. В любой из модификаций мерной линейки в качестве датчика выступают герконы и поплавок с установленном на нём магнитом.

В цифровой версии каждый из датчик подключается на отдельный пин контроллера которые последовательно опрашиваются системой, и при замыкании определённого геркона происходит считывание и передача новых показаний. Данная версия предпочтительна для установки в системах с малым количеством отсчетов или при не высокой точности, так как разрешающая способность системы ограничена количеством пинов контроллера [6-9].

В аналоговой версии мерная линейка работает по принципу резистивного делителя напряжения (рис. 1) – при замыкании контакта соответствующее напряжение подается на вход АЦП контроллера, где происходит его оцифровка и отправка на сервер.

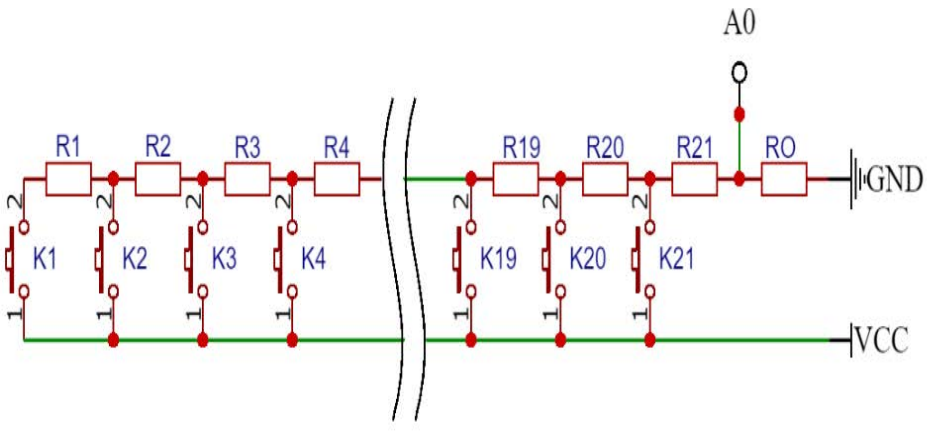


Рис. 1. Принципиальная схема работы мерной линейки

Аналоговый метод лучше цифрового, так как к одному пину могут быть подключены сразу несколько датчиков, что позволяет значительно увеличить разрешающую способность мерной линейки, не задействуя дополнительные пины.

Контроллер насоса

Блок управления клапанами и насосом установлен в скважине и может быть выполнен на двух платформах Arduino MEGA + W5100 и ESP8266 NodeMCU. Контроллер оснащается группами реле согласно задаче, количеству отводов плюс дополнительный канала на управления насосом. Для защиты насоса от перегрузки перед его запуском система проверяет открытие хотя бы одного клапана.

Опционально контроллер может управлять системой осушения колодца, в котором установлена электроника. Для этого в систему добавляется низковольтный насос и датчики верхнего и нижнего уровня воды в колодце.

Алгоритм работы модуля:

1. При пересечении порогового значения одним из баков пользователь получает информационные сообщения.
2. При пересечении критического значения одним из баков сервер активирует клапан этого бака после чего включает насос.
3. В процессе наполнения пользователь так же получает информационные сообщения о прохождении заранее заданных значений.
4. При достижении верхнего порогового значения сервер автоматически останавливает насос и перекрывает клапан бака.

Система осушения колодца, активируется при поднятии уровня воды до верхнего датчика, и выключается при отключении нижнего. Также при ручном управление насос откачки происходит проверка на наличии воды на нижнем уровне, во избежание холостого включения насоса.

Модуль управления отоплением

Основной задачей модуля является контроль температуры в помещениях и создания комфортных условий для проживания. Так же данный модуль помогает увеличить эффективность использование энергоресурсов ресурсов путём автоматизации управления котла.

Основными датчиками в данном модуле являются датчики температуры воздуха (рис. 2). Датчики основаны на микросхеме DS18B20 и ESP-01S.

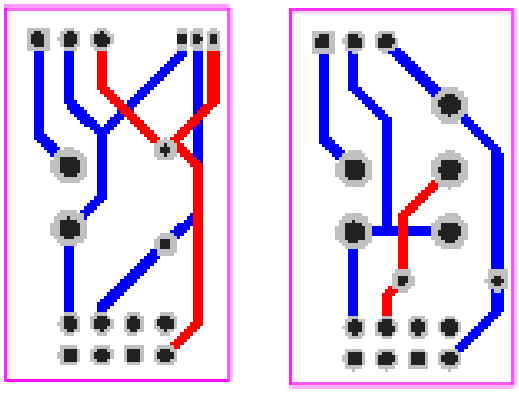


Рис. 2. Плата датчика температуры DS18B20

Для управления контурами систем отопления применяются блоки реле с подключёнными шаровыми клапанами. Данный узел может быть установлен как

единичный непосредственно перед группой потребителей, так и несколько узлов могут быть установлены в одном центре распределения, от этого зависит количество подключаемых в едином центре распределения. От этого зависит выбор используемого контроллера и количество групп реле. В качестве платформы для контроллера здесь могут использоваться NANO + ENC28J60, Arduino MEGA + W5100 и ESP-01S.

Для управления отдельными батареями или контурами тёплого пола предусмотрен модуль управления клапанами 22c230nc. Контроллером данного модуля выступает ESP-01S. Получая данные с сервера контроллер включает или отключает нужный клапан для поддержания заданной температуры.

Для автоматизации котла был установлен контроллер имитирующей сигналы управления с комнатного термостата, для удалённого включения и выключения котла, также контроллер имитирует срабатывание датчик нагрузки для включения режима ограничения мощности котла. Для контроля температуры на вход и выход котла были установлены термодатчики DS18B20.

В комплексе с котлом установлен бойлер для нагрева воды. Бойлер сообщается с котлом и при необходимости подогрева воды включает котёл на контур бойлера. Для удобства использования в бойлере также установлен датчик температуры DS18B20.

Алгоритмы работы модуля:

1. Включение и отключение системы отопления по графику. Данный алгоритм удобен при использовании тёплого пола так как он имеет высокую инертность. Включая систему в ночное время пол прогревается и поддерживает комфортную температуру в течении дня. При установке двухтарифного счётчика данный алгоритм существенно снижает затраты на электроэнергию. Этот алгоритм может применяться как к каким-то отдельным элементам системы, так и ко всей системе сразу.
2. Контроль каждой отдельной климатической зоны. Данный алгоритм считывает температуру в помещении и на дополнительном датчике в полу, если он установлен. Далее сравнивает с температурой, установленной в системе для данной климатической зоны. И при необходимости в контуры этой зоны подаётся теплоноситель, тем самым поддерживая необходимую температуру. Если ни один из контуров не требует подачи теплоносителя, система в целях экономии энергии может выключать котёл.

Модуль управления освещением

Основной задачей модуля является интеллектуальное управление основным освещением помещений и периметра дома.

Для работы данного модуля разработан компактный контроллер, позволяющий управлять нагрузкой как по каналу WI-FI, так и непосредственно с выключателя, установленного рядом с контроллером. При этом актуальное состояние всегда отображается в системе не смотря на метод включения от выключателя или с сервера. Данное устройство включает в себя ESP-01S, микросхему SGL 2IN EX-OR GATE и реле SRD-05VDC-SL-C.

Алгоритмы работы модуля:

1. Алгоритм работы по таймеру. Самой наглядной реализацией данного алгоритма будет являться включение и выключение дежурной подсветки в тёмное время суток.
2. Алгоритм работы по событию. Здесь ярким примером может выступить алгоритм приезда в дом. Когда устройство попадает в зону дома отслеживаемую по GPS, сервер генерирует событие, по которому включается освещение в зоне парковки, вокруг дома и в зоне лестницы.

Модуль умной теплицы

Основной задачей модуля является создание комфортного микроклимата в теплице. А именно поддержание оптимальных для теплицы температуры воздуха, влажности воздуха и почвы, а также оптимального освещения.

Контроллер для модуля основывается на Arduino MEGA + W5100 так как для вычисления точных показателей теплицы используется многократное дублирование датчиков необходима большая вычислительная мощность и большое количество пинов.

Основными показателями в теплице являются температура и влажность поэтому для контроля этих показателей использовались датчики DHT22.

Для получения более достоверных данных используется 4 датчика по углам теплицы, так как в разные моменты времени солнце может освещать отдельные датчик и давать искажение показаний.

Так же важным показателям для роста растений является влажность почвы. Для её измерения используется специализированный датчик влажности почвы FC-28.

Для управления температурой предусмотрено подключение греющего шнура через группу реле SRD-05VDC-SL-C, а также система управления проветриванием теплицы через установленные в ней форточки.

Форточка приводится в движение с помощью винт-гайки с мотором и толкателя, передающего усилие на створку форточки (рис 3).

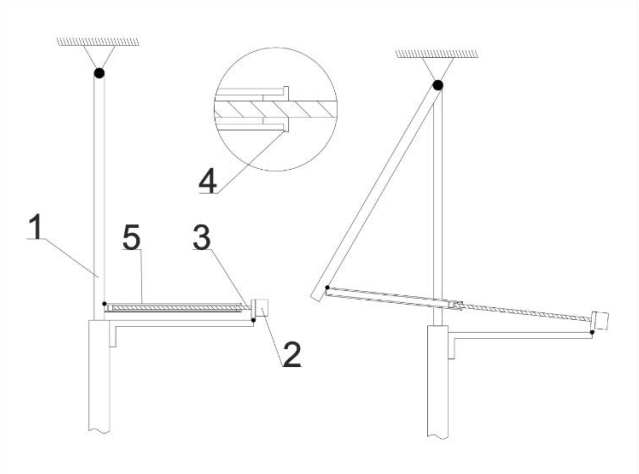


Рис. 3 Устройство управляющего механизма форточки
1 – створка форточки, 2 – мотор, 3 – винт, 4 – гайка, 5 – толкатель.

Исходя из полученных расчётов выбран шаговый двигатель NEMA 17 17HS2408S который полностью отвечает требованиям.

Для открытия форточки на угол 30º необходимо продвинуть толкатель на 29 см. Для используемой пары винт-гайка необходимо произвести 36,4 оборота вала двигателя.

Для увеличения продолжительности светового дня и поддержания оптимальной освещённости для растений используется специализированная светодиодная лента Espada Fito E-ER1 12V.

Алгоритм работы модуля:

1. Контроль температуры воздуха в теплице. Контроллер производит опрос датчиков после чего производит расчёт реального значения так как один из датчиком может быть сильнее освещён и выдавать неправильные значения. Затем происходить сверка полученного значения с допустимым диапазоном и если температура выше диапазона происходить открытие форточки, если же температура ниже диапазона, то происходить включение греющего кабеля, уложенного между растениями. По

возвращению показателей в допустимый диапазон системы проветривания и подогрева выключаются.

2. Контроль влажности воздух в теплице. Контроллер производи опрос датчиков, после чего рассчитывает среднее значение. Если полученное значение находится ниже предельного, то в систему орошения подаётся вода, которая, разбрызгиваясь через форсунки повышает влажность воздуха.

3. Контроль влажности почвы. Контроллер производи опрос датчиков, после чего рассчитывает среднее значение. Если полученное значение находится ниже предельного, то в систему микро капельного полива подаётся вода.

4. Контроль освещённости теплицы. Контроллер опрашивает датчики внешней освещённости теплицы и рассчитывает реальное значение после чего сверяет его с критический. Если значение ниже критического, то происходит считывание со внутренних датчиков освещённости и расчёт дельты которую необходимо дополнить при помощи искусственного освещения и включает освещение согласно расчёту. Если же показатель внешней освещённости находится выше критического происходить отключение искусственного освещения.

Заключение

В ходе реализации проекта, были получены следующие результаты:

1. Был произведён анализ современных систем умного дома, который позволил выбрать и обосновать структуру и используемые средства программно-аппаратного комплекса.
2. Разработана структура программно-аппаратного комплекса
3. Произведена работа по разработке, реализации и внедрению программно-аппаратного комплекса.
4. Разработаны и внедрены алгоритмы работы и взаимодействия модулей.
5. Разработанный комплекс (кроме модуля умной теплицы) внедрён и работает на жилом объекте.
6. Модуль автоматизированного управление системой отопления показал свою эффективность позволив сократить расходы на отопление на 40%.

Литература

1. Петин В.А. «Создание умного дома на базе Arduino». М.: ДМК Пресс. 2018. 180 с.
2. https://mjdm.ru/. Электронный ресурс. Дата обращения 15.03.2019.
3. Сопер М.Э. Практические советы и решения по созданию « Умного дома » / Сопер М. Э. М.: НТ Пресс. 2007. 432 с.
4. Тесля Е.А. «Умный дом» своими руками. Строим интеллектуальную цифровую систему в своей квартире / Тесля Е.А. Санкт Петербург. 2008. 224с.
5. Харке В.Н. «Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилищном строительстве» / Харке В.Н. М.: Техносфера. 2006. 292с.
6. Элсенпитер Т.Р., Дж. Велт. «Умный Дом строим сами» / Элсенпитер Т.Р., Велт Дж / КУДИЦ-ОБРАЗ. 2005. 384с.
7. Гололобов В.Н. «Умный дом» своими руками. / Гололобов В.Н. М.: НТ Пресс, 2007. 416 с.
8. Богданов С.В. Умный Дом. Изд. 2е, перераб. и доп. СПб.: Наука и Техника. 2005. 208 стр.: ил.
9. Монк Саймон Мейкерство. Arduino и Raspberry Pi. Управление движением, светом и звуком: Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург. 2017. 336 с.: ил.

Маковецкая Анастасия Валерьевна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы № V3436,
направление подготовки: 12.03.03 – Фотоника и оптоинформатика,
e-mail: anastasiya.makovectkaya@mail.ru
Орлова Анна Олеговна
Год рождения: 1973
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
центр «Информационные оптические технологии»,
д.ф.-м.н., доцент,
e-mail: a.o.orlova@gmail.com

УДК 535-243

ФОРМИРОВАНИЕ И ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CdSe КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА

А.В. Маковецкая
Научный руководитель –д.ф.-м.н. доцент А.О. Орлова

Аннотация
В работе методом Ленгмюра-Блоджетт сформированы многослойные гибридные структуры на основе наночастиц диоксида титана и квантовых точек CdSe. Показано, что под действием света видимого диапазона гибридные структуры TiO_2/КТ способны генерировать активные формы кислорода, что свидетельствует о фотоиндуцированном переносе электрона от КТ к НЧ TiO_2, эффективность которого составляет более 50%.
Ключевые слова
Наночастицы TiO_2, квантовые точки CdSe, фотоиндуцированный перенос электрона, гибридные структуры, фотокаталитическая активность, антибактериальные системы.

Введение

Наночастицы диоксида титана (НЧ TiO_2) обладают наибольшей фотокаталитической активностью среди других оксидов металлов и нередко используются в разработках антибактериальных систем [1]. При поглощении электромагнитного излучения НЧ TiO_2 способны генерировать активные формы кислорода (АФК), вызывающие деструкцию бактериальных клеток. Диоксид титана относится к широкозонным полупроводниковым материалам (ширина его запрещенной зоны составляет 3,2 эВ), потому TiO_2 может быть активен только в УФ диапазоне. Этот факт накладывает ограничение на применение TiO_2 в медицине из-за вредоносности УФ излучения для живых клеток и тканей.

Устранить этот недостаток можно либо химическим уменьшением ширины запрещенной зоны диоксида титана, либо реализацией переноса электрона от донора в зону проводимости диоксида титана. Один из простых и эффективных способов – создание гибридных структур на основе наночастиц TiO_2 и полупроводника, с более узкой запрещенной зоной. На эту роль хорошо подходят полупроводниковые квантовые точки, которые благодаря их фотохимической стабильности и высокому коэффициенту экстинкции в широком спектральном диапазоне могут активировать

фотокаталитические свойства НЧ диоксида титана в видимом диапазоне в результате фотоиндуцированного переноса электрона к наночастицам диоксида титана [1].

Эффективность переноса электрона в таких структурах в основном зависит от двух факторов. Первый – взаимное расположение зон проводимости КТ и TiO_2, соответственно, граница зоны проводимости донора электрона должна быть как можно выше относительно границы зоны проводимости акцептора. Второй фактор – расстояние между компонентами, которое должно быть минимальным.

В данной работе были сформированы и исследованы многослойные структуры TiO_2/КТ. Для формирования слоев с плотной упаковкой НЧ была использована технология Ленгмюра-Блоджетт при формировании каждого компонента многослойных структур TiO_2/КТ. Было показано, что в таких структурах реализуется фотоиндуцированный перенос электрона от КТ к НЧ TiO_2 с эффективностью более 50%, а среднее значение константы скорости переноса электрона составляет $\langle k_{ET} \rangle \geq 4 \cdot 10^{10}$ c^{-1}.

Материалы и методы

В данной работе использовались наночастицы TiO_2 со средним диаметром 2 нм и квантовые точки CdSe со средним диаметром 2,6 нм. Стоит отметить, что КТ CdSe использовались без дополнительной полупроводниковой оболочки, т.к. она является потенциальным барьером для переноса электрона. Экситонный пик поглощения КТ приходится на 520 нм, люминесценции – на 530 нм.

Гибридные структуры TiO_2/КТ были сформированы на диэлектрической подложке и состояли из монослоя КТ CdSe и нанесенного сверху монослоя НЧ TiO_2. Каждый слой был сформирован по технологии Ленгмюра-Блоджетт, обеспечивающей наиболее плотную упаковку частиц в монослое, что должно способствовать повышению эффективности переноса электрона от КТ к НЧ TiO_2 в гибридных структурах.

Для оценки эффективности переноса электрона по генерации АФК использовался химический сенсор p-Nitrosodimethylaniline (RNO), часто используемый для детектирования АФК. В качестве источников излучения использовались светодиод с длиной волны излучения 460 нм, мощностью 6,5 мВт и ртутная лампа с выделенной фильтрами длиной волны излучения 365 нм, мощностью 2 мВт.

Регистрация спектров поглощения раствора RNO производилась на спектрофотометре UV-3600 (Shimadzu) в области 200–800 нм. Для исследования кинетики затухания люминесценции КТ использовался лазерный сканирующий люминесцентный микроскоп MicroTime 100 (PicoQuant), длина волны излучения импульсного диодного лазера – 405 нм. Кривая затухания люминесценции аппроксимировалась трехэкспоненциальной функцией вида $y = A_1 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_1}) + A_2 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_2}) + A_3 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_3})$, где A_1, A_2, A_3 – интенсивности люминесценции фракций КТ в момент времени $t=0$; τ_1, τ_2, τ_3 – времена затухания люминесценции для трех фракций ансамбля КТ.

Результаты и обсуждение

Исследование фотофизических свойств гибридных структур TiO_2/КТ

При формировании гибридных структур TiO_2/КТ появляется новый канал дезактивации электронного возбуждения в КТ, связанный с переносом электрона от КТ к НЧ TiO_2 и конкурирующий с люминесценцией КТ в составе гибридных структур. Соответственно, оценить эффективность переноса электрона можно по изменению люминесцентных свойств КТ при переходе от слоя КТ к гибридным структурам. Стоит отметить, что нередко в КТ наблюдается явление «блинкинг» (мерцание), которое

описывается возможностью КТ переключаться между люминесцирующими и нелюминесцирующими состояниями [2]. Вследствие чего в ансамбле КТ присутствует несколько фракций, характеризующихся разными временами затухания люминесценции, и одна из их – «темная» фракция, сигнал от которой не может быть зарегистрирован. Также из-за малой поверхностной концентрации КТ на подложках и в многослойных структурах технически невозможно зарегистрировать корректные спектры поглощения и люминесценции. Поэтому далее анализ люминесцентных свойств слоев КТ и гибридных структур проводился только по кинетике затухания люминесценции образцов.

На рис. 1 приведены кривые затухания люминесценции КТ в слое и в гибридных структурах.

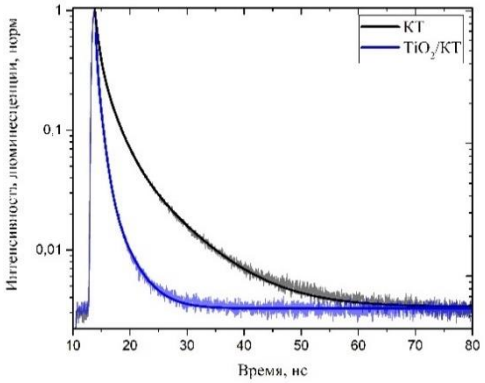


Рис. 1. Затухание люминесценции КТ CdSe в сухом слое и в гибридных структурах TiO_2/КТ. Кривые аппроксимированы трехэкспоненциальной функцией вида

$$y = A_1 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_1}) + A_2 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_2}) + A_3 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_3})$$

Из анализа данных аппроксимации кривых затухания люминесценции было получено, что формирование гибридных структур TiO_2/КТ привело как к сокращению времен затухания люминесценции КТ, так и к уменьшению соответствующих амплитуд по сравнению со слоем КТ. В данном случае кинетика затухания люминесценции КТ в составе гибридных структур регистрировалась при одинаковой поверхностной концентрации КТ в слое и в гибридных структурах. Поэтому уменьшение амплитуд говорит о том, что вследствие фотоиндуцированного переноса электрона люминесценция части КТ была потушена нацело.

Эффективность тушения КТ при взаимодействии с НЧ TiO_2 может выступать в качестве оценки эффективности переноса электрона от люминесцирующих фракций КТ к НЧ TiO_2 в гибридных структурах в предположении, что при переходе от слоя КТ к гибридным структурам перенос электрона является доминирующим каналом, и все тушение люминесценции КТ связано именно с переносом электрона, а также с учетом того, что излучательная и безызлучательная константы КТ не меняются при переходе от слоя КТ к гибридным структурам TiO_2/КТ. С учетом этих предположений может быть получена также константа скорости переноса электрона. При наличии трех фракций в ансамбле КТ с разными временами затухания люминесценции эффективность тушения в структурах может быть оценена по формуле:

$$Q = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} A^i \cdot \frac{\tau^i}{\tau_r}}{\sum_{i=1}^{k} A_0^i \cdot \frac{\tau_0^i}{\tau_r}}, \quad (1)$$

где I и I_0 – интенсивность люминесценции люминофора при его взаимодействии с тушителем и в свободном состоянии, соответственно; A^i – амплитуда i-й фракции КТ в момент времени $t=0$, которая пропорциональна концентрации КТ в i-й фракции ($I^i \sim C^i \cdot \varphi^i \sim A^i \cdot \frac{\tau^i}{\tau_r}$); τ^i – характерное время затухания i-й фракции КТ; τ_r – излучательное время КТ CdSe (25 нс [3]).

Расчеты, выполненные по формуле (1), показали, что эффективность тушения люминесценции КТ в составе гибридных структур TiO_2/КТ составила 70±5%. Также данные кинетики затухания люминесценции позволяют оценить средневзвешенную константу скорости переноса электрона (<k_{ET}>) в структурах по формуле (2):

$$< k_{ET} >= \sum_i (k^l_{ET_i} \cdot A(\%)^l_i + k^q_{ET_i} \cdot A(\%)^q_i), \quad (2)$$

где $k^l_{ET_i}$ и $k^q_{ET_i}$ – константа скорости переноса электрона от i-й фракции для КТ, частично потушенных и потушенных нацело в результате переноса электрона, соответственно; $A(\%)^l_i$ и $A(\%)^q_i$ – доля i-й фракции для КТ, частично потушенных и потушенных нацело в результате переноса электрона, соответственно.

Выражения для безызлучательной константы (k^i_{nr}) для каждой фракции и константы скорости переноса электрона от каждой фракции для КТ, потушенных частично и потушенных нацело в результате переноса электрона, могут быть получены из выражений для квантового выхода люминесценции, который можно определить по формулам (3), (4):

$$\varphi^i_{KT} = k_r \tau_i = \frac{k_r}{k_r + k^i_{nr}}, \quad (3)$$

$$\varphi^i_{TiO_2/KT} = k_r \tau_i = \frac{k_r}{k_r + k^i_{nr} + k^l_{ET_i} (\text{или } k^q_{ET_i})}, \quad (4)$$

где φ^i_{KT} и $\varphi^i_{TiO_2/KT}$ – квантовый выход люминесценции i-й фракции КТ в слое и в составе гибридных структур, соответственно; k_r – излучательная константа ($k_r = 4 \cdot 10^7$ с$^{-1}$ для КТ CdSe [3]). Квантовый выход люминесценции потушенных нацело КТ был принят равным 0,1%, т. е. это наибольшее значение квантового выхода люминесценции, при котором сигнал от КТ не может быть зарегистрирован.

Таким образом, константа скорости переноса электрона от КТ, включая потушенные нацело КТ, была получена по формуле (2) и составила $< k_{ET} > \geq 4 \cdot 10^{10}$ с$^{-1}$. Это соответствует теоретическим оценкам [4], в то время как в исследованиях, в которых не учитывается перенос электрона от потушенных нацело КТ, значение константы скорости переноса электрона на два порядка ниже [5].

Известно, что КТ CdSe, не имеющие дополнительной полупроводниковой оболочки, являются чувствительными к условиям окружающей среды, и множество других факторов могут влиять на люминесценцию таких КТ. Поэтому приведенные выше оценки не могут быть неоспоримым доказательством функциональности гибридных структур. Экспериментальным доказательством переноса электрона является генерация АФК гибридными структурами TiO_2/КТ под действием внешнего излучения, лежащего в области прозрачности TiO_2 и поглощаемого исключительно КТ. Соответственно, на следующем этапе была исследована генерация АФК гибридными

структурами TiO_2/КТ под действием видимого излучения.

Исследование фотокаталитических свойств гибридных структур TiO_2/КТ

Фотокаталитические свойства слоя КТ CdSe, слоя НЧ TiO_2 и гибридных структур TiO_2/КТ исследовались с помощью химического сенсора RNO, который традиционно используется в качестве химического индикатора АФК в экспериментах с НЧ TiO_2. При взаимодействии с АФК оптическая плотность сенсора RNO уменьшается в полосе поглощения на 440 нм. Соответственно, для слоя КТ CdSe, слоя НЧ TiO_2 и гибридных структур TiO_2/КТ были получены зависимости изменения оптической плотности сенсора на 440 нм от дозы облучения слоев и гибридных структур видимым светом, которые показаны на рис. 2.

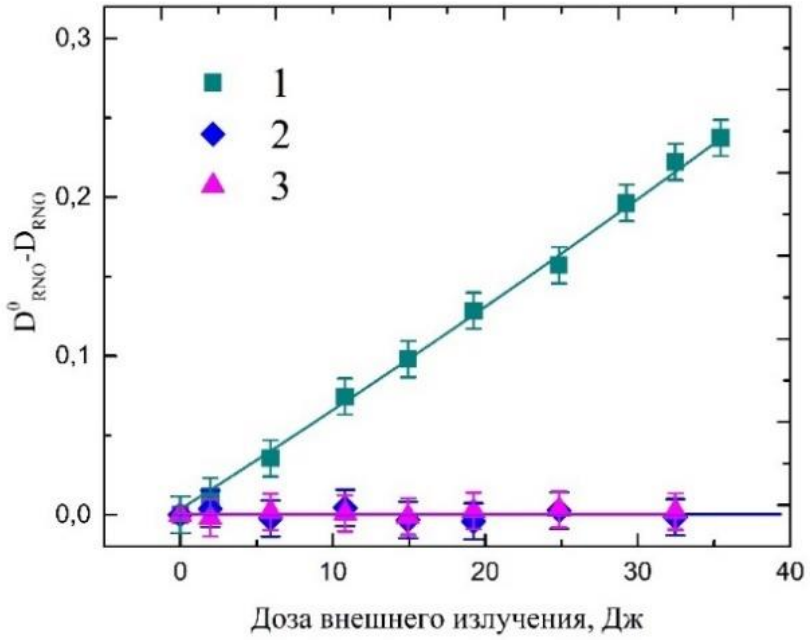


Рис. 2. Зависимость изменения оптической плотности сенсора RNO на 440 нм от дозы излучения с длиной волны 460 нм для гибридных структур TiO_2/КТ (1), слоя КТ CdSe (2), слоя НЧ TiO_2 (3)

Данные, представленные на рис. 2, демонстрируют фотообесцвечивание сенсора в результате генерации АФК гибридными структурами TiO_2/КТ под действием видимого излучения, в то время, как при воздействии видимого излучения на НЧ TiO_2 или слой КТ генерации АФК не происходит. Это означает, что генерация АФК гибридными структурами происходит именно в результате переноса электрона от КТ к НЧ TiO_2. Полученные данные также коррелируют с тушением люминесценции КТ при переходе к гибридным структурам, что описывалось ранее.

Оценка эффективности переноса электрона в гибридных структурах TiO_2/КТ может быть проведена на основании сравнения сенсибилизированной генерации АФК гибридными структурами под действием видимого излучения за счет переноса электрона от КТ с генерацией АФК слоем НЧ TiO_2 за счет прямого поглощения УФ излучения. На рис. 3 представлены зависимости обесцвечивания сенсора в результате генерации АФК гибридными структурами под действием видимого излучения и слоем НЧ TiO_2 под УФ излучением от дозы поглощенного гибридными структурами или слоем НЧ TiO_2 излучения.

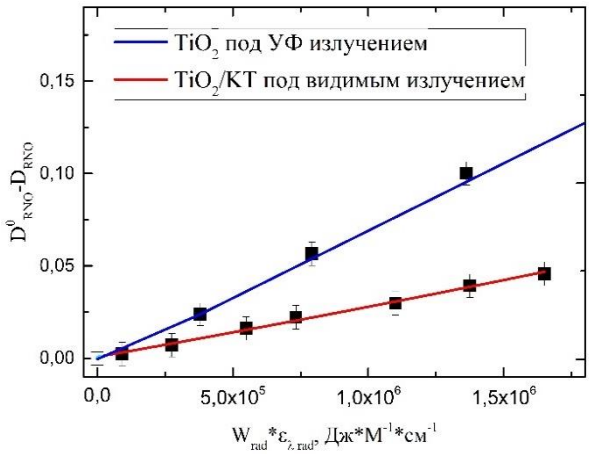


Рис. 3. Зависимость изменения оптической плотности сенсора RNO на 440 нм от дозы поглощенного излучения с длиной волны 460 нм для гибридных структур TiO_2/КТ (1) и с длиной волны 365 нм для слоя НЧ TiO_2 (2)

Как видно из рис. 3, эффективность генерации АФК гибридными структурами под действием видимого излучения меньше, чем эффективность генерации АФК слоем НЧ TiO_2 под УФ излучением, что может быть обусловлено рядом причин: 1) отличием в коэффициентах экстинкции на длине волны 350 нм для НЧ TiO_2 и для КТ на 460 нм; 2) эффективностью переноса электрона от КТ к НЧ TiO_2 меньшей 100%; 3) не оптимальным соотношением компонентов структур.

Оценка эффективности переноса электрона от КТ к НЧ TiO_2 в гибридных структурах TiO_2/КТ по данным генерации АФК производилась на основании следующих представлений. Изменение оптической плотности сенсора RNO в полосе поглощения на 440 нм пропорционально концентрации АФК N_{ROS}, сгенерированных гибридными структурами, т. е. $N_{ROS} \sim \Delta D_{RNO}$. В то же время, концентрация АФК, сгенерированных НЧ TiO_2, зависит от количества электронов в их зоне проводимости: $N_{ROS} = N_e \cdot E_{ROS}$, где N_e – количество электронов в зоне проводимости НЧ TiO_2 в результате поглощения внешнего излучения; E_{ROS} – эффективность генерации АФК наночастицами TiO_2.

В случае гибридных структур TiO_2/КТ количество электронов N_e^{sens}, оказавшихся в зоне проводимости НЧ TiO_2 в результате фотоиндуцированного переноса электрона от КТ, может быть рассчитано по следующей формуле: $N_e^{sens} = N_e^{QDs} \cdot E_{ET} = (1 - T_\lambda^{QDs}) \cdot W_\lambda^{sens} \cdot E_{ET}$, где N_e^{QDs} – количество электронов, сгенерированных в слое КТ в результате поглощения падающего на КТ излучения; E_{ET} – эффективность переноса электрона от КТ к НЧ TiO2; $(1 - T_\lambda^{QDs})$ – поглощенная слоем КТ доля излучения с длиной волны λ; W_λ^{sens} – количество фотонов с энергией hc/λ, падающих на слой КТ в секунду.

При соблюдении одинаковых условий, т. е. концентрации сенсора RNO, НЧ TiO_2, количестве воды и кислорода, при исследовании генерации АФК слоем НЧ TiO_2, который выступает в качестве референтного образца, эффективность переноса электрона может быть рассчитана по следующей формуле:

$$E_{ET} = \frac{\Delta D_{RNO}^{sens}}{\Delta D_{RNO}^{direct}} \cdot \frac{(1 - T_\lambda^{TiO_2}) \cdot W_\lambda^{direct}}{(1 - T_\lambda^{QDs}) \cdot W_\lambda^{sens}}, \quad (5)$$

где ΔD_{RNO}^{sens} и ΔD_{RNO}^{direct} – изменения оптической плотности сенсора RNO на 440 нм в результате генерации АФК гибридными структурами и слоем НЧ TiO_2 соответственно; $(1-T_{\lambda}^{TiO_2})$ – поглощенная слоем НЧ TiO_2 доля излучения с длиной волны λ; W_{λ}^{direct} – количество фотонов с энергией hc/λ, падающих на слой НЧ TiO_2 в секунду.

Анализ данных, представленных на рис. 3, показал, что эффективность переноса электрона в гибридных структурах TiO_2/КТ составляет 55±5% в соответствии с уравнением (5). Следует также отметить, что уравнение (5) позволяет оценить среднюю эффективность переноса электрона из всего ансамбля КТ, включая темную фракцию КТ. Таким образом, причина расхождения между эффективностью переноса электрона, оцененной с помощью тушения люминесценции КТ (70±5%), и ее среднего значения (55±5%), может быть объяснена наличием темной фракции КТ, которая не может быть учтена при анализе свойств люминесцирующей фракции КТ.

Заключение

В работе были сформированы многослойные гибридные структуры TiO_2/КТ по технологии Ленгмюра-Блоджетт и исследованы методами конфокальной и время-разрешенной люминесцентной микроскопии. В результате анализа люминесцентных свойств КТ в слое и в гибридных структурах, и исследования эффективности генерации АФК гибридными структурами под действием света видимого диапазона было установлено, что в гибридных структурах TiO_2/КТ реализуется фотоиндуцированный перенос электрона от КТ к НЧ TiO_2.

Анализ степени тушения люминесценции КТ в составе гибридных структур с учетом изменения числа люминесцирующих КТ в каждой из фракций показал, что средняя скорость ($<k_{ET}>$) передачи электрона от люминесцирующих фракций КТ превышает $4\cdot10^{10}$ c^{-1}, что хорошо согласуется с теоретическими оценками.

Исследование фотокаталитической активности гибридных структур под действием видимого диапазона позволило оценить среднюю эффективность переноса электрона от всего ансамбля КТ к НЧ TiO_2, которая составила 55±5%. Различие в полученных разными методами оценок эффективности переноса электрона обусловлено наличием нелюминесцирующей фракции в ансамбле КТ, которая не может быть учтена при оценке по кинетике люминесценции, но эти КТ также являются донорами электрона.

Таким образом, многослойные гибридные структуры TiO_2/КТ являются перспективной антибактериальной системой, демонстрирующей фотокаталитическую активность под действием видимого излучения.

Литература

1. Fagan R., McCormack D.E., Dionysiou D.D., Pillai S.C. A review of solar and visible light active TiO2 photocatalysis for treating bacteria, cyanotoxins and contaminants of emerging concern // Materials Science in Semiconductor Processing. 2016. Т. 42. С. 2–14.
2. Issac A., Von Borczyskowski C., Cichos F. Correlation between photoluminescence intermittency of CdSe quantum dots and self-trapped states in dielectric media // Physical Review B. 2005. Т. 71. № 16. С. 161302.
3. Brokmann X. et al.. Measurement of the radiative and nonradiative decay rates of single CdSe nanocrystals through a controlled modification of their spontaneous emission // Physical Review Letters. 2004. Т. 93. № 10. С. 10740.
4. Tvrdy K., Frantsuzov P.A., Kamat P.V. Photoinduced electron transfer from semiconductor quantum dots to metal oxide nanoparticles // Proceedings of the National

Academy of Sciences. 2011. Т. 108. № 1. С. 29–34.
5. Sellers D.G., Watson D. F. Probing the Energetic Distribution of Injected Electrons at Quantum Dot–Linker–TiO2 Interfaces //The Journal of Physical Chemistry C. 2012. Т. 116. №. 36. С. 19215–19224.

Мамжиева Мария Александровна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
студент группы № L3415,
направление подготовки: 12.03.05 – Лазерная техника
и лазерные технологии
e-mail: maruskamamzhieva@gmail.com
Самохвалов Андрей Александрович
Год рождения: 1987
Университет ИТМО,
факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники,
к.т.н.,
e-mail: samokhvalov.itmo@gmail.com

УДК 621.373.826.

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ С МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

М.А. Мамжиева
Научный руководитель – к.т.н. А.А. Самохвалов

Аннотация
В работе исследована возможность создания наночастиц с магнитными свойствами методом лазерной абляции под слоем жидкости. Были синтезированы коллоидные растворы оксидов железа и никеля и изучены их оптические и магнитные свойства, проведена оценка распределения полученных наночастиц по размерам в зависимости от длительности импульса и исследован химический состав полученных коллоидов.

Ключевые слова
Магнитные наночастицы, лазерная абляция, синтез, магнитные свойства, коллоидные растворы.

В настоящее время ведутся активные исследования наночастиц, проявляющих магнитные свойства. Наиболее изученные из них - наночастицы оксида золота, хрома, железа, кобальта и никеля. В перспективе их собираются использовать для адресной доставки лекарств к раковым клеткам, уплотнения записи информации на носители, а также для эффективной очистки сточных вод от загрязняющих веществ [1, 2]. Для синтеза магнитных наночастиц используют различные методы: химические, биологические и физические [3]. Лазерная абляция является физическим, безотходным методом, позволяющим относительно недорого получить химически чистый, монодисперсный по размерам материал, в обычной воздушной среде, без повышенных требований к помещению и без вреда для окружающей среды [4]. Так как синтез проводится в жидкости, в результате получается коллоидный раствор, удобный в хранении и транспортировке.

Исследование синтезированных коллоидных растворов методом лазерной абляции мишеней из химически чистых железа Fe и никеля Ni проводилось в несколько этапов:

1. Изучение оптических свойств коллоидных растворов Fe и Ni.
2. Оценка распределения наночастиц по размерам в зависимости от длительности импульса.

3. Изучение химического состава коллоидов и исследование магнитных свойств полученных наночастиц.

Для синтеза наночастиц была использована лазерная установка «Минимаркер-2» (волоконный иттербиевый лазер). В качестве мишеней использовались химически чистые образцы никеля Ni и железа Fe (99,999%), которые помещались на дно чашки Петри под слой дистиллированной воды. Толщина слоя жидкости над образцом составляла 1 мм. Далее синтезировались коллоидные растворы методом лазерной абляции при различных параметрах лазерного излучения.

Для изучения оптических свойств образцы облучались волоконным иттербиевым лазером с длительностью импульса 200 нс, частотой 10 кГц, скоростью сканирования 500 мм/сек, плотностью энергии 5,3 - 47,9 Дж/см^2.

Полученные коллоидные растворы были помещены в кюветы объемом 4 мл и были исследованы при помощи спектрофотометров СФ-56 и AvaSpec-3648. Результаты представлены на рис. 1: раствор оксида никеля (слева) и оксида железа (справа). Можно заметить, что коллоиды имеют поглощение в ультрафиолетовом диапазоне, а также что форма спектра и полосы поглощения не менялись в зависимости от плотности энергии.

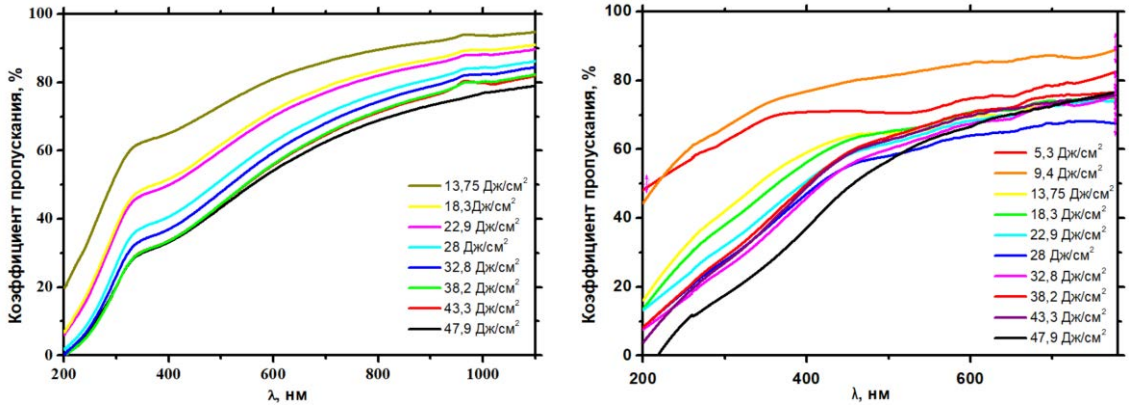


Рис. 1. Спектры коэффициента пропускания коллоидного раствора оксида никеля (слева) и оксида железа (справа) в зависимости от плотности энергии

Оценка распределения синтезированных наночастиц по размерам в зависимости от длительности импульса проводилась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Изображения были обработаны в программе ImageJ и на основании полученных данных построены гистограммы (рис. 2-5), отражающие количественное распределение частиц по размерам.

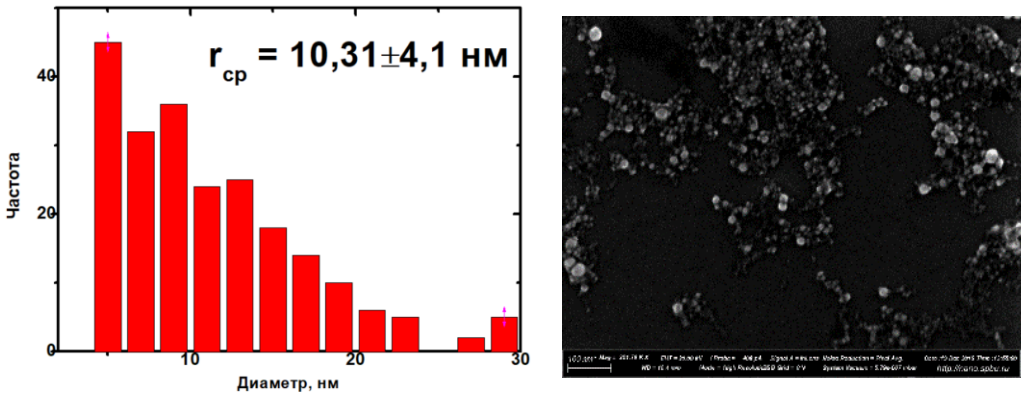


Рис. 2. Распределение наночастиц оксида никеля по размерам при длительности импульса 200 нс

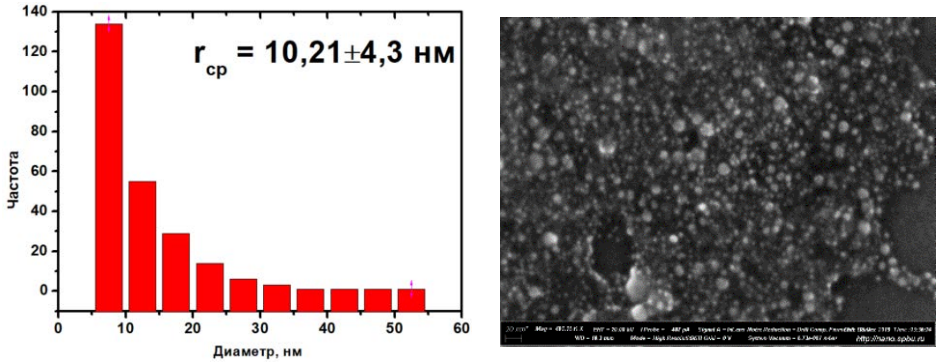


Рис. 3. Распределение наночастиц оксида никеля по размерам при длительности импульса 8 нс

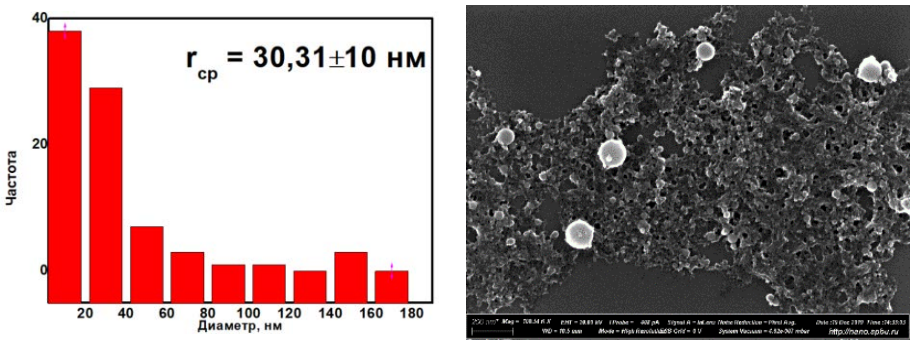


Рис. 4. Распределение наночастиц оксида железа
по размерам при длительности импульса 200 нс

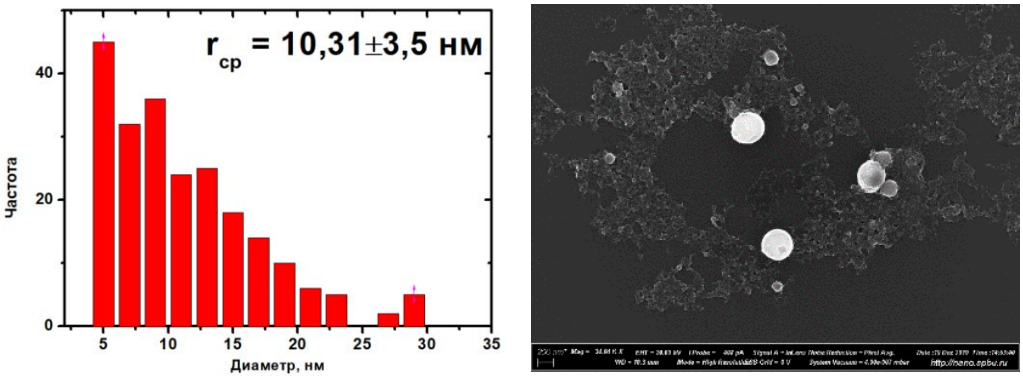


Рис. 5. Распределение наночастиц оксида железа по размерам при длительности импульса 8 нс

По гистограммам распределения частиц видно, что средний размер наночастиц оксида никеля вне зависимости от длительности импульса приходится на 10 нм. Средний размер наночастиц оксида железа составил 30 нм при 200 нс и 10 нм при 8 нс.

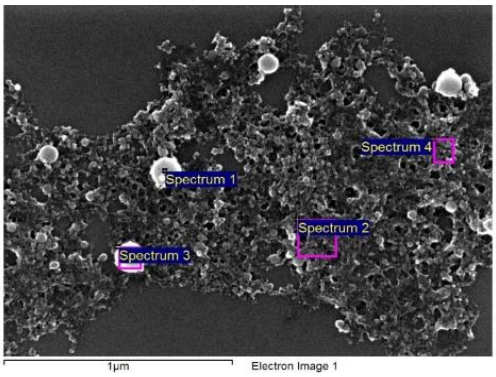
Железо существует в степени окисления +2 и +3, поэтому может образовывать как оксиды FeO, Fe_2O_3, так и Fe_3O_4. Для исследования химического состава коллоидов была применена энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия. Результаты представлены на рис. 6 и 7.

Были вычислены массовые соотношения железа и кислорода в оксидах, представленные в таблице, исходя из которых можно сделать вывод, что при абляции с длительностью импульса 200 нс были получены наночастицы оксида Fe_2O_3, а при абляции с длительностью импульса 8 нс получены наночастицы оксидов FeO и Fe_2O_3.

Таблица

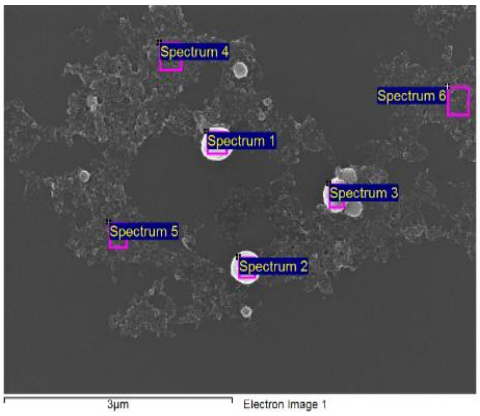
Массовые соотношения железа и кислорода в оксидах железа

Оксид	Массовое соотношение железа, %	Массовое соотношение кислорода, %
FeO	78	22
Fe_2O_3	70	30
Fe_3O_4	72	28



Spectrum	In stats.	O	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	42.16	57.84	100.00
Spectrum 2	Yes	64.38	35.62	100.00
Spectrum 3	Yes	43.97	56.03	100.00
Spectrum 4	Yes	53.71	46.29	100.00

Рис. 6. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии коллоидного раствора оксида железа при абляции длительностью импульса 200 нс и энергии в импульсе 1 мДж



Spectrum	In stats.	O	Fe	Total
Spectrum 1	Yes	20.17	79.83	100.00
Spectrum 2	Yes	20.04	79.96	100.00
Spectrum 3	Yes	31.22	68.78	100.00
Spectrum 4	Yes	58.65	41.35	100.00
Spectrum 5	Yes	60.51	39.49	100.00
Spectrum 6	Yes	68.35	31.65	100.00

Рис. 7. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии коллоидного раствора оксида железа при абляции длительностью импульса 8 нс и энергии в импульсе 1 мДж

По полосе поглощения, полученной в работе [5] и нашей можно сказать, что были получены наночастицы оксида никеля NiO.

С целью изучения магнитных свойств полученных наночастиц были синтезированы коллоидные растворы с большой оптической плотностью и проведены опыты при воздействии внешнего магнитного поля (рис. 8 и 9). Параметры излучения: длительность импульса 200 нс, частота 10 кГц, скорость сканирования 500 мм/сек, плотность энергии 47,9 Дж/см^2. Были показаны магнитные свойства полученных наночастиц.

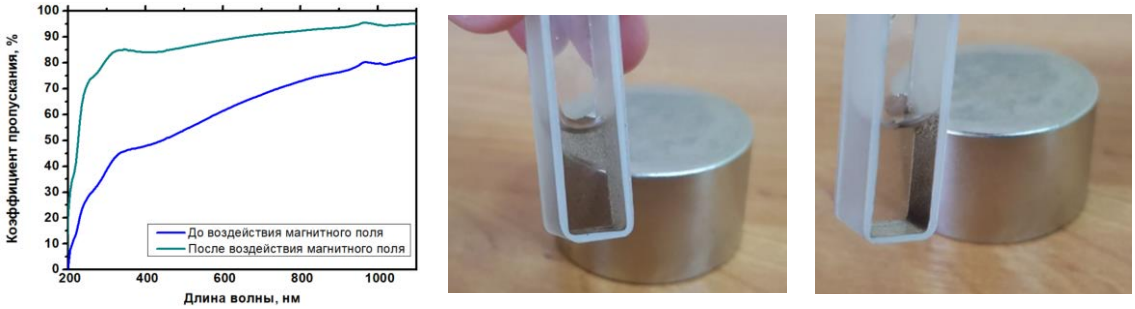


Рис. 8. Спектр пропускания и фотографии до и после воздействия
на коллоидный раствор оксида никеля магнитного поля

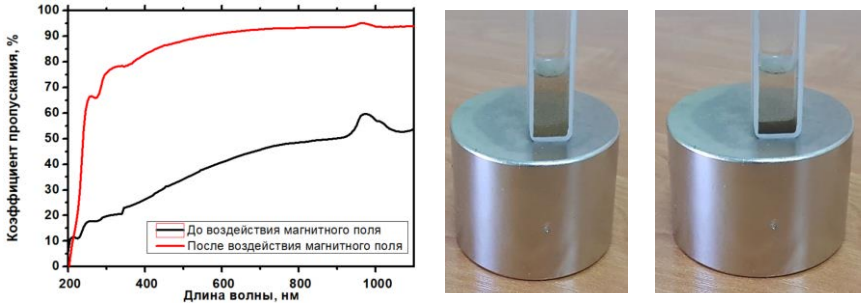


Рис. 9. Спектр пропускания и фотографии до и после
воздействия на коллоидный раствор оксида железа магнитного поля

В результате были синтезированы коллоидные растворы оксидов железа и никеля методом лазерной абляции под слоем жидкости и исследованы их оптические и магнитные свойства, оценены распределения магнитных наночастиц по размерам в зависимости от длительности импульса, а также изучен их химический состав.

Литература

1. Першина А.Г., Сазонов А.Э., Мильто И.В. Использование магнитных наночастиц в биомедицине // Бюллетень сибирской медицины. 2008. №2.
2. Нанотехнологии в процессах очистки сточных вод // ГК Аргель, 2015
3. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю., “Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства”, Усп. хим. 74:6 (2005). 539–574; Russian Chem. Reviews. 74:6 (2005) с. 489–520.
4. Barcikowski, S., Amendola, V. Handbook of Laser Synthesis of Colloids. DuEPublico, 2016. 152 p.
5. Khashan K.S., Sulaiman G.M., Hamad A.H. et al. Generation of NiO nanoparticles via pulsed laser ablation in deionised water and their antibacterial activity. Appl. Phys. A 123. 190 (2017).

Нкодиа Даниэла-Клер
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы № N3450,
направление подготовки: 10.03.01 – Организация и технология защиты информации,
e-mail: nkodia@mail.ru
Юрьева Радда Алексеевна
Год рождения: 1989
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
к.т.н. ассистент (квалификационная категория ассистент),
e-mail: raddaiureva@itmo.ru

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА СЕТЕВОГО ТРАФИКА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Д.-К. Нкодиа
Научный руководитель – к.т.н., ассистент Р.А. Юрьева

Аннотация
Каждый год увеличивается количество найденных уязвимостей, и совершаются новые атаки на информационные системы, поэтому повышение уровня информационной безопасности остается актуальной задачей. В работе исследована область сетевого трафика с помощью методов искусственного интеллекта и разработан анализатор сетевого трафика, совмещающий в себе классификацию трафика и выявление аномалий, что позволяет обнаруживать новые типы атак.
Ключевые слова
Информационная безопасность, машинное обучение, аномалии, сетевой трафик, обнаружение атак, классификация.

По причине постоянного роста количества совершенных деструктивных воздействий и вследствие появления уникальных атак на информационные системы для поддержания необходимого уровня защищенности следует применять меры, учитывающие не только различные векторы атак, но и непрерывное появление новых технологий и средств. На данный момент разработаны различные средства обеспечения информационной безопасности, каждое из которых охватывает определенный тип угроз. Для автоматизации анализа, контроля и управления средствами защиты применяют специализированные системы (далее SIEM), сочетающие управление информацией о безопасности и управление событиями безопасности. Но несмотря на применение комплексных решений все равно злоумышленникам удается успешно проводить атаки за счет создания новых видов воздействий. Поэтому предлагается усовершенствовать SIEM системы, подключая к ним средства способные обрабатывать новые данные, несуществующие во время разработки средства. Эта задача, с одной стороны, может решаться с помощью регулярного и своевременного обновления компонента, которое не всегда появляется до проведения первых атак на недавно выявленные уязвимости. С другой стороны, более эффективным способом будет создание автоматизированных и интеллектуальных средств защиты, обеспечивающих

выработку решений на основе автоматизации информационных процессов и способных работать с раннее неизвестными данными.

Второй подход уже применяют в одном из направлений обеспечения информационной безопасности (далее ИБ). А именно, предлагается использовать средства своевременного детектирования аномального сетевого трафика, предоставляющее возможность своевременно предпринять необходимые меры [1]. В связи с этим поставлена задача разработать анализатор сетевого трафика. Анализатор должен представлять из себя программный продукт, способный самостоятельно принимать решение о состоянии безопасности системы на основе проходящего через него сетевого трафика. При разработке были рассмотрены уже существующие решения для создания более эффективного продукта.

Для повышения качества работы различных систем, в том числе систем обеспечения ИБ, применяют искусственные нейронные сети и методы машинного обучения. На данный момент проведено большое количество исследований с использованием разных методов классификации трафика на известные типы атак. В ходе аналитического обзора способов анализа трафика были рассмотрены следующие статистические методы машинного обучения (далее МО): дерево решений, случайный лес, метод опорных векторов, метод k-ближайших соседей, логистическая регрессия, метод k-средних. Из вероятностных методов рассмотрены реализации наивного байесовского классификатора (далее НБ). А в качестве примеров нейросетевых подходов были проанализированы результаты работы искусственных нейронных сетей (далее НС), в том числе сверточной и рекуррентной.

Определив недостатки и достоинства, а также сравнив результаты работы перечисленных методов по существующим исследованиям, были выделены три подхода к анализу трафика, показавшие наилучшие результаты: на основе НБ, на основе дерева решений и на основе НС [1-4]. Но несмотря на высокие результаты классификации трафика, было принято решение не применять нейросетевые методы для разработанного анализатора. Так как такие методы обладают значительным недостатком: они требуют большого количество ресурсов для обучения алгоритма. Подходы на основе дерева решений наоборот положительно выделяются за счет своих преимуществ над остальными при решении задач ИБ. Данный метод не требует особой подготовки данных, что ускоряет процесс анализа и дает возможность вовремя среагировать на инциденты ИБ. А также дерево решений хорошо работает при наборах данных с большим количеством параметров, что необходимо для более точного описания трафика и отличия сетевых атак от нормальных потоков.

Дополнительным результатом данного исследования является определение наиболее эффективного метода классификации трафика на известные типы атак среди четырех методов, основанных на алгоритмах НБ классификатора и Деревьях принятия решений. Точности классификации алгоритмов дерево решений, случайный лес, НБ и НБ с усилением «Бустинг» соответственно равны 85.5%, 89.3%, 70.7%, 87.2%. Для тестирования алгоритмов использовался набор данных NSL-KDD. Алгоритм случайный лес выбран для классификации трафика.

В предложенном анализаторе сетевого трафика не менее важную роль по сравнению с функцией классификации трафика играет функция выявления аномалий. Алгоритмы выявления аномалий не имеют возможности определять к какому именно классу относится объект, но зато могут детектировать что-либо новое, отличающееся от обучающей выборки. Применение таких методов дает возможность детектировать любое аномальное состояние трафика в сети, вызванное известными и неизвестными для администратора ИБ атаками, утечкой данных и иными нарушениями ИБ объекта защиты. Существенное преимущество методов выявления аномалий заключается в отсутствии необходимости описывать аномальное состояние системы.

Исследований, посвященных методам обнаружения аномалий в сетевом трафике, значительно меньше по сравнению с работами по классификации трафика. Поэтому при разработке анализатора было дополнительно проведено сравнение методов выявления аномалий для обеспечения защищенности от угроз нулевого дня.

Для обнаружения аномалий было проведено сравнение двух алгоритмов: одноклассовый метод опорных векторов и локальный уровень выброса (далее LOF от англ. Local Outlier Factor). Для разработанного анализатора трафика выбран второй метод, показавший лучшие результаты – разность среднего гармонического параметров оценки составляла 17%. Алгоритм основан на сравнении локальной плотности конкретной точки с локальными плотностями её n (например, 20) соседей. Если плотность значительно меньше, то точка считается выбросом. Локальная плотность оценивается расстоянием, которым точка может быть «достигнута» от соседних точек.

Также по результатам тестирования рассмотренных методов обнаружения аномалий можно заключить, что их явным недостатком является низкая точность работы – не более 60%, которая приводит к большому количеству ложных срабатываний алгоритма.

Предложенный алгоритм анализа трафика заключается в объединении эффективного метода классификации для возможности обнаруживать и определять уже известные типы атак и метода обнаружения аномалий для выявления любых новых инцидентов ИБ в сети. В качестве основных входных данных для анализатора предложено использовать параметры, соответствующие сетевым потокам, для добавления возможности обнаруживать утечки информации, которые не могут осуществить системы обнаружения и предотвращения вторжений. Под сетевым потоком понимается взаимодействие между одной и той же парой IP-адресов, по одному и тому же транспортному протоколу в пределах заданного числа секунд [3]. Атрибутами потоков выбраны следующие параметры: частота передачи пакетов, размер переданных данных в одну и другую стороны взаимодействия, используемые протокол и порт, количество подключений к одному из хостов, количество переданных пакетов, число ошибочных фрагментов.

Результатом работы классификатора является либо уведомление об обнаруженной сетевой атаке конкретного типа, либо данные, определенные как «нормальные» - не классифицированные ни к одному из типов атак. Во втором случае особенно важно убедиться в том, что классификатор не пропустил какую-либо атаку – не классифицировал атаку как «нормальные» данные. Для этого предлагается дополнительно проанализировать данные, помеченные классификатором как «нормальные», с помощью метода выявления аномалий.

Для корректной работы алгоритма LOF входные данные подвергаются следующей обработке:

– Все атрибуты сетевого потока переводятся в числовой формат. Например, каждому названию протокола назначается уникальный номер.

– Производится нормализация данных по принципу минимакс — линейному преобразованию данных в диапазоне от нуля до одного, где минимальное и максимальное масштабируемые значения равны 0 и 1 соответственно. Для преобразования к каждому параметру данных применяется следующая формула:

$$Xnorm = \frac{X - Xmin}{Xmax - Xmin}.$$

где X_{min} – минимальное значение атрибута в обучающей выборки; X_{max} – максимальное значение атрибута в обучающей выборки; X – фактическое значение параметра; X_{norm} – нормализованное значение параметра.

– Применяется метод главных компонент для уменьшения размерности

данных до 3. Данное число получено подбором при сравнении результатов при разной размерности. Лучшие результаты обнаружение аномалий были получены при размерности 2 и 3, разница между ними составляет 8%.

На основе выявленных аномалий оператор системы управления принимает решение о дальнейших действиях. В том числе, если обнаруженная аномалия окажется, по мнению оператора, инцидентом ИБ, можно обновить базу данных известных атак для повышения точности классификатора и ускорения работы по реагированию на возможные инциденты в будущем.

Все выявленные анализатором инциденты ИБ записываются в журнал событий, который в дальнейшем можно использовать для анализа состояния защищенности рассматриваемой системы.

На рис. 1 представлена схема разработанного алгоритма. Схема выполнена с использованием унифицированного языка моделирования в виде диаграммы деятельности.

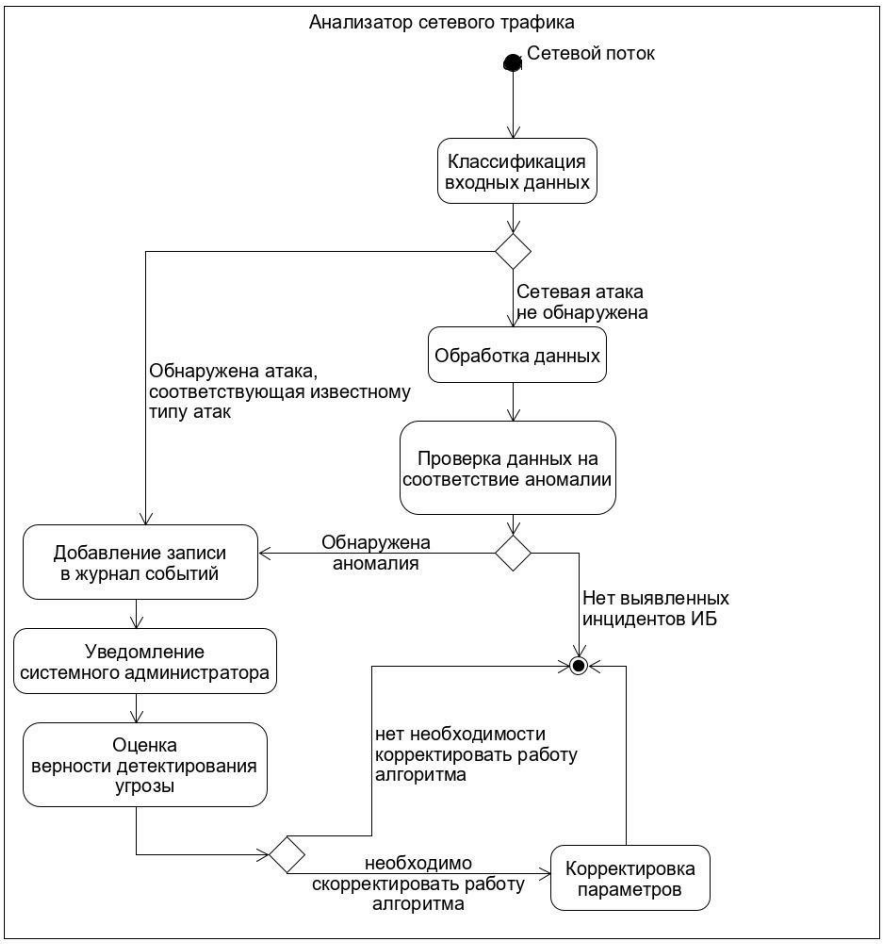


Рис. 1. Алгоритм анализа сетевого трафика

Для реализации предложенного алгоритма использовался язык программирования Python и библиотеки pandas, numpy, sklearn.

Для более наглядной проверки работы разработанного анализатора сетевого трафика было проведено три разных эксперимента с использованием наборов NSL-KDD и UNSW-NB15, содержащие атаки типа сканирования, отказ в обслуживании, получение несанкционированного удаленного доступа и другие.

Далее приведены необходимые этапы эксперимента:

1. Отбор данных, соответствующих потокам сетевого взаимодействия при штатном режиме системы. Могут использоваться данные из наборов NSL-KDD и UNSW-NB15 с метками «normal».
2. Обучение функции выявления аномалий на отобранных данных.
3. Отбор данных, соответствующих потокам сетевого взаимодействия при проведении атак. Могут использоваться данные наборов NSL-KDD и UNSW-NB15.
4. Разделение всех отобранных данных на обучающий и тестовый наборы в соотношение четыре к одному.
5. Обучение функции классификации трафика на обучающем размеченном наборе.
6. Запуск анализатора сетевого трафика с использованием тестового набора.
7. Оценка результатов классификации трафика.
8. Оценка результатов обнаружения аномалий в трафике.

Для выявления и обработки инцидентов ИБ главными параметрами оценки методов МО можно считать F-меру как общий показатель точности результатов, и полноту. Результатом вычитания из ста процентов значения параметра полнота является процент элементов класса, которые неправильно классифицированы алгоритмом. Чем меньше значение полноты, тем больше инцидентов классификатор не смог выявить, что критично для обеспечения безопасности. Это значит, что в защищаемой системе могут присутствовать угрозы нарушения ИБ, которые анализатор не сможет выявить и о которых администратор ИБ не узнает, следовательно не предпримет своевременные меры защиты информации.

Согласно полученным результатам, представленным в виде гистограммы на рис. 2, можно заключить, что предложенный анализатор успешно повышает уровень ИБ защищаемой системы. Применение анализатора позволяет верно обнаруживать атаки типа Probe, Analysis и Reconnaissance и, следовательно, обеспечивает конфиденциальность информации. Уровень доступности информационной системы зависит от своевременного детектирования таких атак как Dos и Fuzzers. А обнаружение анализатором реализации остальных рассмотренных атак – эксплуатации уязвимостей информационной системы и получения несанкционированного доступа к ней – обеспечит высокий уровень ИБ (конфиденциальности, целостности и доступности) системы.

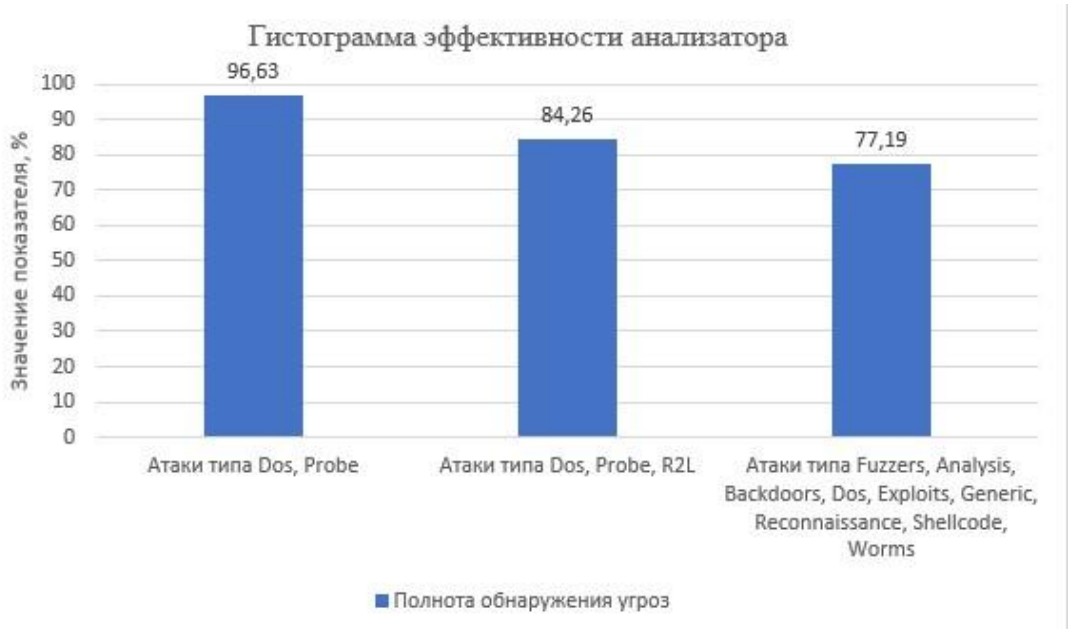


Рис. 2. Эффективность применения анализатора

В ходе выпускной квалификационной работы:

1. Исследована область анализа трафика на основе методов искусственного интеллекта.
2. Выявлены наиболее эффективные для решения задач ИБ методы МО.
3. Определены анализируемые параметры сетевого трафика.
4. Разработан алгоритм анализа сетевого трафика.
5. Сформулирована методика проведения эксперимента и проведены эксперименты.
6. Оценена эффективность анализа трафика.

Результатом данной работы является разработанный подход к обработке сетевого трафика, совмещающий в себе интеллектуальные методы классификации и выявления аномалий для обнаружения сетевых атак.

В качестве дальнейшей работы планируется модифицировать программный код анализатора для работы в реальном времени, а также рассмотреть иные алгоритмы обнаружения аномалий для повышения эффективности применения анализатора.

Практическая значимость представленного программного решения заключается в возможности использования анализатора в составе SIEM систем и на объектах КИИ, так как с помощью него выполняется требование о защите информации Приказа ФСТЭК России №17, обеспечивая обнаружение вторжений в информационной системе [5].

Литература

1. Sultana A. Intelligent network intrusion detection system using data mining techniques / Sultana, A., Jabbar, M. A. // 2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT), Bangalore. 2016. С. 329-333.
2. Liu X. Predicting Network Attacks with CNN by Constructing Images from NetFlow Data / Liu X., Tang Z., Yang B. // 2019 IEEE 5th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS). 2019. С. 61-66.
3. Костин Д.В., Шелухин О.И. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для проведения классификации сетевого зашифрованного трафика // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №9. С. 43-52.
4. Rahman, C.M. Adaptive Intrusion Detection based on Boosting and Naïve Bayesian Classifier / Farid, D.M., Rahman, M.Z. // International Journal of Computer Applications. 2011. Том 24. № 3. С.12-19.
5. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17 «Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах» // Российская газета. 2013 г. № 136.

Пасечный Дмитрий Сергеевич
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
студент группы № Т3417,
направление подготовки: 19.03.02. – Технология бродильных производств и виноделия,
e-mail: pase4niy.dima@yandex.ru
Смотраева Ирина Владимировна,
Университет ИТМО,
факультет пищевых биотехнологий и инженерии,
к.т.н., доцент,
e-mail: irinasmotraeava@yandex.ru

УДК 664.8.033

РАЗРАБОТКА ПОРОШКООБРАЗНОГО КОНЦЕНТРАТА БЕЗАЛКОГОЛЬКОГО НАПИТКА

Д.С. Пасечный
Научный руководитель – к.т.н., доцент И.В. Смотраева

Работа выполнена в рамках темы НИР «Разработка порошкообразного концентрата безалкогольного напитка».

Аннотация
В целях предупреждения или решения проблемы алиментарных заболеваний крайне важно разработать и добиться внедрения в производство высококачественного продукта, богатого биологически активными веществами. Неправильное хранение и некоторые режимы температурной обработки не позволяют достигнуть поставленной цели. Настоящая НИР посвящена разработке технологии концентрата напитка, позволяющей сохранять нативность исходного сырья. Обезвоженные продукты (напитки) имеют ряд преимуществ: повышенный срок годности, удобство транспортирования, быстрота восстановления и отсутствие потребности в больших складских площадях.
Ключевые слова
Напитки, растительное сырье, биологические активное вещества, концентраты, вакуумное выпаривание, вакуумная сушка.

Введение

Растительное сырьё играет важнейшую роль в пищевой промышленности в целом и в индустрии напитков, в частности. В растениях содержится огромное количество веществ, оказывающих физиологическое действие на организм человека [1, 2].

Все вещества, входящие в состав растительного сырья, используемого в производстве напитков и биологически активных добавок, можно подразделить на растворимые и нерастворимые. К первой категории относятся дубильные вещества, пигменты (каротиноиды), некоторые углеводы, кислоты, минеральные соединения. Вторую категорию образуют лигнин, целлюлоза, гемицеллюлозы и другие. Именно растворимые вещества играют определяющую роль в производстве напитков [3-5].

Напитки на растительной основе, по мнению диетологов – одна из наиболее оптимальных форм продуктов, удовлетворяющих потребности организма в биологически активных веществах (БАВ). Исходя из современных тенденций,

потребитель стремится к потреблению продуктов (напитков, в частности) из натурального сырья, изначально богатого БАВ.

Одной из наиболее важных и актуальных задач пищевой промышленности является повышение качества готовых продуктов и входящих в их состав компонентов. Приоритетным фактором является сохранение природных свойств и биологически активных веществ продуктов и сырья.

Некоторые виды температурной обработки и неправильное хранение готовой продукции не позволяют достигнуть поставленных целей. Поэтому выбор технологии – чрезвычайно ответственное решение. Важнейший сегмент мирового рынка – сублимированные продукты, полученные в результате вакуумной сублимационной сушки [6-9].

Данный способ позволяет более полно сохранить полезные компоненты сырья (витамины, микроэлементы), в чём состоит его преимущество перед другими видами температурной обработки.

Полученные сублимацией продукты требуют регидратации перед употреблением (кофе, чай, сок, первые и вторые блюда, каши, пюре, ягоды и т.д.) Однако также существуют сублимированные продукты, готовые к употреблению, не требующие восстановления водой. Примером может послужить жевательная резинка, описанная в зарубежной статье Kliger D. «Freeze dried, ready to consume food products and processes for their preparation». Содержание влаги не превышает 5% от общей массы.

В РФ производство концентрированных напитков менее развито, чем в зарубежных странах (на долю США приходится около половины мировой продукции порошкообразных смесей). Развитие в нашей стране вышеприведенной индустрии позволит расширить ассортимент выпускаемой продукции. Помимо сухих прохладительных напитков (в том числе, на ароматизаторах), актуально производство порошкообразных концентратов, богатых биологически активными веществами. К таким следует отнести напитки на растительных экстрактах, настоях.

К основным преимуществам порошкообразных концентрированных напитков следует отнести: быстроту и простоту приготовления (восстановления), повышенный срок годности, удобство транспортировки и отсутствие потребности в больших складских площадях.

Цели и задачи:

- Разработка рецептуры напитка, богатого биологически активными веществами.
- Разработка принципиальной технологической схемы получения порошкообразного концентрата.
- Изучение влияния режимов термической обработки на показатели готового напитка.
- Предложение способа внедрения разработанной технологии на производство.

Разработка рецептуры:

В качестве сырья были выбрана сушеные плоды шиповника майского.

В целях достижения оптимального уровня содержания полезных веществ и высоких органолептических показателей экстракт шиповника был приготовлен по рецептуре 12 г сырья на 200 г воды.

Разработка принципиальной технологической схемы получения порошкообразного концентрата на примере напитка безалкогольного на основе сушеных плодов шиповника

Принципиальная технологическая схема получения порошкообразного

концентрата на примере напитка безалкогольного на основе сушеных плодов шиповника изображена на рис. 1.

Рис. 1. Принципиальная технологическая схема получения порошкообразного концентрата

Описание принципиальной технологической схемы получения порошкообразного концентрата:

1. Подготовка сырья. На предприятии перед производственным циклом сырье (сушеные плоды шиповника) необходимо подвергнуть очистке и мойке в целях отделения возможных примесей (сплава).
2. Измельчение (дробление). Для лучшего последующего извлечения растворимых веществ сырье рекомендуется измельчить.
3. Экстрагирование (получение настоя). Для сохранения нативных свойств рекомендуется использовать воду температурой не более 100°С (80-85°С). Продолжительность данной стадии – 8-12 часов. СВ настоя =2.00±0.50%
4. Фильтрация. Проводится в целях отделения твердой фракции от жидкой. В результате напиток получается осветленным (легкая опалесценция допускается).
5. Вакуумное выпаривание.
6. Сушка.
7. Измельчение полученного сухого продукта. Данная операция необходима для получения однородного порошка.
8. Добавление сахарной пудры в порошок.
9. Просеивание с магнитным уловителем. Необходимо для получения порошка однородных по размеру частиц сухих веществ и отделения возможных примесей (в том числе, ферромагнитных).
10. Фасовка и упаковка.

Термообработка, необходимая для получения порошкообразного концентрата, по разработанной технологии, состоит и выпаривания, и сушки

Выпариванием называют процесс концентрирования растворов твёрдых нелетучих/малолетучих веществ путём испарения растворителя и отвода образовавшихся паров.

В зависимости от свойств выпариваемых растворов и параметров теплоносителей

выпаривание осуществляется при повышенном давлении, а также в условиях вакуума. Последнее благоприятно при обработке термолабильных продуктов.

Однократное выпаривание. Применяют в малотоннажных производствах. Можно проводить непрерывно и периодически. К основным элементам установки следует отнести выпарной аппарат (верхняя часть – сепаратор для отделения капель от вторичного пара; нижняя – греющая камера, представляющая собой кожухотрубный теплообменник); подогреватель; барометрический конденсатор и насосы. Образующийся при выпаривании вторичный пар никак не применяется в установке, а конденсируется в конденсаторе.

Многократное выпаривание. Проводится в ряде выпарных аппаратов, расположенных последовательно. Во всех корпусах, кроме первого, в качестве греющего пара используется вторичный пар предыдущего корпуса, что выгодно, с точки зрения экономии теплоносителя. Многократное выпаривание можно осуществлять при использовании греющего пара высокого давления или в условиях вакуумметрического давления.

Выпаривание при избыточном давлении связано с повышением температуры кипения раствора, поэтому не подходит для большинства пищевых продуктов с низкой термостойкостью. По взаимному направлению движения греющего пара и выпариваемого раствора многокорпусные установки подразделяются на прямоточные (раствор самотеком перетекает из корпуса в корпус, недостаток – снижение коэффициента теплопередачи) и противоточные (нужно использовать насосы, т.к. раствор движется от меньшего давления к большему из последнего корпуса в первый). В последних более высокий коэффициент теплопередачи.

В случае прямотока в первом корпусе раствор получает теплоту от пара наиболее высоких рабочих параметров, а в последнем частично упаренный раствор обогревается паром наиболее низкого давления. От корпуса к корпусу увеличивается концентрация раствора, уменьшаются давление, температура и коэффициент теплопередачи.

Преимущества многократного вакуумного выпаривания:

- В условиях пониженного давления лучше сохраняются полезные свойства экстрактов (за счет понижения температуры кипения);
- Использование вторичного пара в качестве теплоносителя выгодно, с точки зрения экономии теплоносителя (из котельной);
- Благодаря общему перепаду давления в установке, отпадает необходимость в насосах для перекачки пара и продукта из корпуса в корпус, за счет чего уменьшаются материальные затраты.

Сушка – это тепломассообменный процесс, протекание которого может привести к необратимым изменениям в продукте. Эти изменения обусловлены, как правило, тепловым воздействием. По способу подвода теплоты сушка подразделяется на конвективную, контактную (через стенку), радиационную (инфракрасное излучение) …

Вопрос повышения температуры сушильного агента неоднозначен. С одной стороны, данный фактор интенсифицирует процесс, с другой, продукт может терять полезные компоненты сырья. Исходя из литературных источников, можно сделать вывод, что количественные потери начальных характеристик есть функция температуры и времени высушивания.

Высушивание сырья и готовых продуктов вместе с хранением в холоде и замораживанием относится к важнейшим способам реализации длительного срока хранения в различных отраслях пищевой индустрии. В настоящее времени создана техническая база, позволяющая вести данный процесс в условиях щадящих температурных режимов, то есть условиях, при которых полезные свойства продуктов сохраняются. Для создания щадящих режимов применяется вакуум. Вода испаряется при температурах высушиваемого объекта около 10-25 °С, давление в камере – 10-30

мм рт. ст. (температура – это функция давления). Для данного способа требуются меньшие затраты, чем для первого, отсутствует необходимость предварительного замораживания. Качество продуктов после обезвоживания путём вакуумного испарения влаги сильно превосходит по сравнению с тепловой сушкой при атмосферном давлении.

Определение режимов вакуумного выпаривания и сушки

Температура процессов была подобрана на основании экспериментов и литературных источников. Сильное повышение данного параметра пагубно бы сказалось на сохранении полезных свойств экстракта. С другой стороны, слишком сильное понижение температуры привело бы к значительному удлинению процесса во времени. Для достижения целей работы была выбрана t=75 °C.

С помощью графика, подобного изображенному на рис. 2, было определено давление, которое должно быть создано при вакуумном выпаривании. Желаемой температуре процесса 75 °C соответствует давление 0.033 Мпа:

– рабс = ратм – рв;
– где рабс – абсолютное давление в камере аппарата;
– ратм – атмосферное давление;
– рв – вакуумметрическое давление (разрежение, которое необходимое создать).

Тогда рв = ратм - рабс.

Например, атмосферное давление 0.102 МПа, а желаемое давление термообработки 0.033 МПа. Тогда разрежение, необходимое создать: 0.102 – 0.033 = 0.069 МПа.

Температуры сушки соответствовала температуре выпаривания и составляла 75 °C.

Пониженная температура (ниже 100 °C) и давление ниже атмосферного (на этапе выпаривания) позволяют характеризовать термическую обработку как щадящую, ввиду чего можно говорить о возможности лучше сохранять нативность биологически активных веществ растительного сырья.

Приготовленный экстракт был подвергнут вакуумному выпариванию в ротационном испарителе при t=75 °C и давлении 0.033 МПа. Процесс был реализован в ротационном испарителе (роторная вакуум-выпарная установка). Оборудование предназначено для быстрого удаления жидкостей их отгонкой при пониженном давлении, которое создается вакуумным насосом.

Для получения порошкообразного концентрата из частично сконцентрированного напитка был использован сушильный шкаф Е-4610.

Вентилятор всасывает воздух из рабочей камеры через решетку в задней стенке на электрический нагревательный элемент. Пройдя через нагреватель, воздух выбрасывается через вертикальные щели вдоль боковых стенок и снова попадает в рабочую камеру, где расположены высушиваемые образцы. Циркуляция теплоносителя непрерывная.

Процесс проводился при температуре t=75 °C до получения сухого остатка. Характеристики сушки:

- по способу подвода теплоты к высушиваемому материалу – сушка конвективная;
- по величине давления – при атмосферном давлении;
- теплоноситель – нагретый воздух.

Полученный по окончании высушивания твердый остаток был подвергнут измельчению. Затем к нему была добавлена сахарная пудра.

Органолептические и физико-химические показатели сухого концентрата представлены в таблице.

Таблица

Органолептические и физико-химические показатели сухого концентрата

Показатель	Значение
Влажность, %	≤ 5
Цвет	Красно-коричневый
Консистенция	Однородная, порошкообразная
Запах	Свойственный шиповнику

Исследования

В целях подтверждения полезных свойств напитка на основе шиповника и изучения влияния режима термической обработки был проведен ряд исследований.

Полифенольные соединения (в том числе дубильные вещества и антоцианы) относятся к мощным антиокислителям, что выводит их на передний план в борьбе со свободными радикалами.

Содержание дубильных веществ (ДВ) в сырье было определено титриметрическим методом.

В 12 г сырья (именно столько идет на приготовление одной порции напитка) содержится 158 мг дубильных веществ, что составляет 79 % адекватного уровня суточного потребления, согласно Методическим рекомендациям МР 2.3.1.1915-04.

Потери дубильных веществ при термообработке составили 17 %.

Следующим исследованием было определение содержания антоцианов. Метод заключается в стабилизации окраски экстракта подкисленным этиловым спиртом, последующем центрифугировании и определении оптических характеристик, коррелирующих с количественным содержанием антоцианов.

В одной порции (200 мл) напитка содержится 13 мг антоцианов, что составляет 26 % адекватного уровня суточного потребления, согласно Методическим рекомендациям МР 2.3.1.1915-04.

Потери антоцианов при термообработке составили 26 %.

Реализация технологии в условиях производства

Термообработку (и выпаривание, и сушку) в условиях производства необходимо проводить под вакуумом. Реализовать выпаривание рекомендуется в двухкорпусной вакуумной выпарной установке, аппаратурно-технологическая схема которой представлена на рис. 2.

Исходный разбавленный раствор из промежуточной ёмкости 1 центробежным насосом 2 подаётся в теплообменник 3 (в котором исходный раствор подогревается до температуры, близкой к температуре кипения. Это целесообразно, с точки зрения интенсификации выпаривания), а затем – в первый корпус 4 выпарной установки.

Два корпуса ВВУ представляют собой два последовательно расположенных выпарных аппарата.

Первый корпус обогревается первичным водяным паром, поступившим из котельной. Образующийся при концентрировании раствора в первом корпусе 4 вторичный пар направляется в качестве греющего во второй корпус 5. Сюда же поступает частично упаренный раствор из первого корпуса.

Самопроизвольный переток раствора и вторичного пара от корпуса к корпусу возможен вследствие общего перепада давлений, возникающего в результате создания вакуума конденсацией вторичного пара последнего корпуса в барометрическом

конденсаторе смешения 6. В нем заданное давление поддерживается подачей охлаждающей воды и отсосом неконденсирующихся газов вакуум-насосом 7. Смесь охлаждающей воды и конденсата выводится из конденсатора при помощи барометрической трубы с гидрозатвором 8. Образующийся во втором корпусе концентрированный раствор центробежным насосом 9 подаётся в промежуточную ёмкость упаренного раствора 10. Конденсат греющих паров из выпарных аппаратов выводится с помощью конденсатоотводчиков 12.

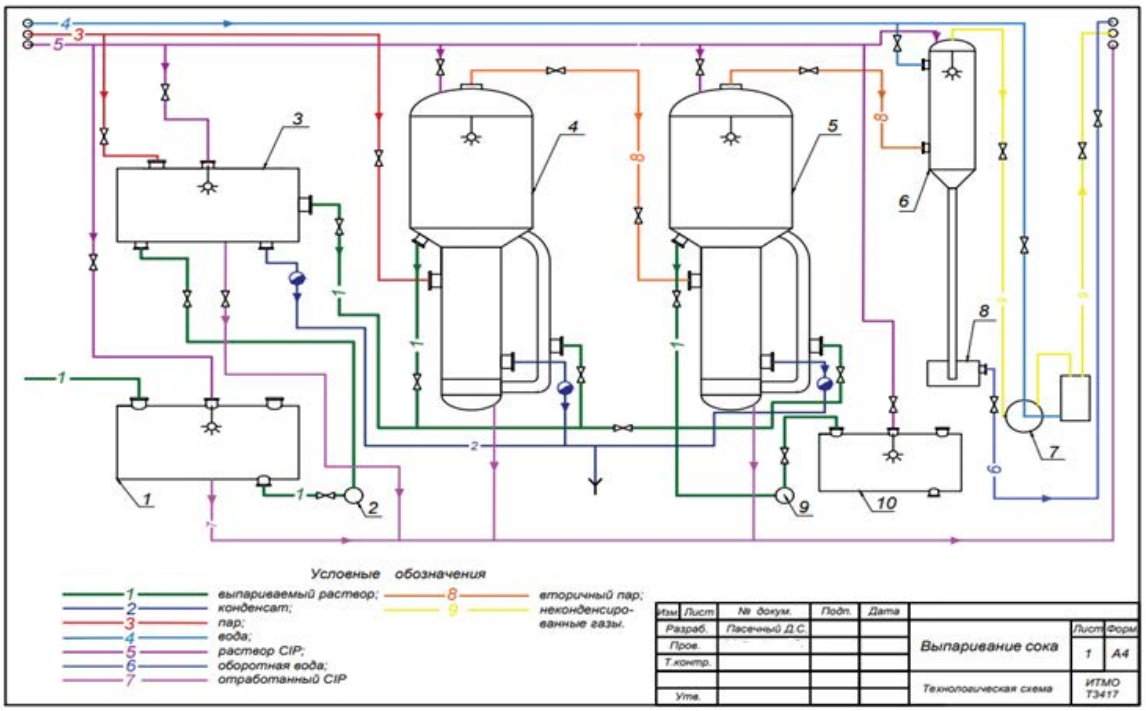


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема выпаривания в ВВУ

Основные выводы

- Разработанный напиток на основе шиповника является источником полифенольных соединений (дубильных веществ, антоцианов).
- Термообработка в условиях вакуума является щадящей, что позволяет сохранять полезные свойства экстрактов.
- Разработанная технология может быть реализована в условиях лабораторий и производства.

Литература

1. Ламан Н., Копылова Н. Шиповник-природный концентрат витаминов и антиоксидантов //Наука и инновации. 2017. Т. 10. №. 176.
2. Kliger D. Freeze dried, ready to consume food products and processes for their preparation: заяв. пат. 16326959 США. 2019.
3. Бакуменко О. Е., Алексеенко Е. В., Рубан Н. В. Возможности использования сублимированных растительных порошков при производстве зерновых экструдированных продуктов //Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. №. 1.
4. Мякинникова Е. И., Касьянов Г. И. Сухие быстровосстанавливаемые концентраты для производства напитков //Электронный сетевой политематический журнал" Научные труды КубГТУ". 2015. №. 4. С. 288-300.
5. Магомедов Г.О., Олейникова А.Я., Плотникова И.В. [и др.]. Функциональные

пищевые ингредиенты и добавки в производстве кондитерских изделий: учеб. Пособие. СПб.: ГИОРД. 2015. 440 с.
6. Сублимация (физика). [Электронный ресурс]. URL:https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_(%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0). Дата обращения. 05.02.2020.
7. Румянцев Ю.Д., Калюнов В.С. Холодильная техника: Учеб. для вузов. СПб.: Изд-во «Профессия». 2005. 360 с., ил.
8. Семенов Г.В., Буданцев Е.В., Булкин М.С. Современное оборудование для производства сублимированных продуктов //Пищевая промышленность. 2008. №. 11.
9. Аверьянова Е.В. Физиологически активные вещества растительного сырья: учебное пособие / Аверьянова Е.В., Школьникова М.Н., Егорова Е.Ю. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2010. 105 с.

Подколзина Светлана Сергеевна
Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
студент группы №P3402,
направление подготовки: 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника,
e-mail: podkolzina.s@bk.ru
Дергачев Андрей Михайлович
Год рождения: 1963
Университет ИТМО,
факультет программной инженерии и компьютерной техники,
к.т.н., доцент,
e-mail: amd@itmo.ru

УДК 004.42 + 621.865.8 + 004.932

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПАКОВКИ ОБЪЕКТОВ В ФИГУРУ НЕПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

С.С. Подколзина
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.М. Дергачев

Аннотация
В рамках работы создано программное обеспечение, позволяющее пользователю автоматизировать процесс упаковки объектов в фигуру непрямоугольной формы. Для этого разработана гибкая система из 4 модулей. Для обработки изображений использовалась библиотека компьютерного зрения OpenCV. Для работы с манипулятором использовался симулятор V-REP. Разработан алгоритм для решения задачи упаковки. Получившаяся программа позволяет пользователю обнаружить предметы, задать форму упаковки и автоматически произвести процесс укладки манипулятором.

Ключевые слова
Обработка изображений, манипулятор, автоматизация сборки, программное обеспечение, алгоритм упаковки.

Современные технологии позволяют по-новому решить проблемы, связанные со сложностью упаковки предметов на больших складах или производствах [1]. В настоящее время такая задача, как упаковка продуктов в один заказ (и, соответственно, одну форму) выполняется вручную из-за сложностей автоматизации системы [2]. Обычно для решения данной задачи необходимым условием является знание размеров всех возможных предметов и, как следствие, актуализация базы данных при каждом новом поступлении. В результате такого подхода программное обеспечение в связке с роботом-манипулятором смогут выполнять упаковку автономно. Для упрощения этого процесса предлагается решить задачу упаковки с использованием компьютерного зрения. В результате, этап с занесением размеров каждого предмета будет исключен. Предполагается, что в таком случае автоматизация упаковки будет дешевле для организации, а значит и для конечного покупателя. Цель данной работы – практическое решение задачи упаковки объектов заранее неизвестной геометрии в автоматическом режиме.

Анализ архитектуры описываемой системы

Система упаковки объектов с помощью манипулятора состоит из трех частей: интерфейс пользователя, программный блок и манипулятор. Программный блок, в свою очередь, содержит модули для общения с пользователем и манипулятором, модуль для обработки изображений и модуль для решения задачи упаковки. Для реализации программного блока использовался язык программирования Python 3.2.

Модуль для взаимодействия с манипулятором

Для удобной работы с манипулятором используется симуляция в программе V-REP [3]. В качестве примера выбран манипулятор модели UR10. Это робот компании Universal Robots создан для широкого спектра задач, в числе которых возможность захватывать и перемещать различные предметы, необходимая в данной работе. Модель данного манипулятора входит в учебный пакет программы V-REP, а материалы, необходимые для решения прямой и обратной задачи кинематики, находятся в свободном доступе. В ходе разработки были написаны модули для отдельного перемещения по изменению углов или конечных координат. Помимо функции управления, этот модуль включает в себя передачу снимков, сделанных с камеры на захвате.

Листнинг. Функции для перемещения манипулятора

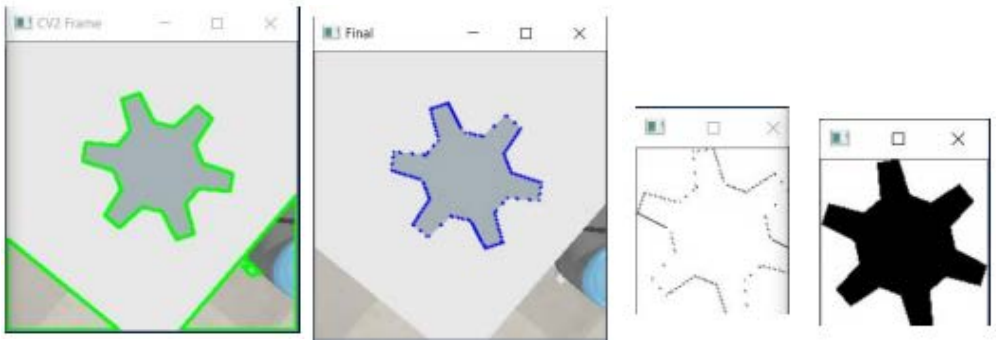
```
def shiftManWithIK(target_position, target_orientation,
orient_zone, clientID, kinematic_chain, jointID):
      initial = kinematic_chain.inverse_kinematics(target_position ,
target_orientation, orient_zone)
      position = kinematic_chain.forward_kinematics(initial)[:3, 3]
      print("\nPos : ", target_position, "\nOri: ", target_orientation, "
\nRecount pos: ", position)
      for i in range(JOINT_NO):

      vrep.simxSetJointTargetPosition(clientID,jointID[i],initial[i],vrep.simx
_opmode_oneshot_wait)

def shiftManWithCorner(clientID, initial, kinematic_chain, gripperID,
jointID):
      position = kinematic_chain.forward_kinematics(initial)
      print("\nOrig corners: ", initial, "\nCount coords: ",position )
      for i in range(JOINT_NO):
      vrep.simxSetJointTargetPosition(clientID,jointID[i],initial[i],vrep.simx
_opmode_oneshot_wait)
      err,orient = vrep.simxGetObjectOrientation(clientID,gripperID,-
1,vrep.simx_opmode_oneshot_wait)
      if err == -1:
            print("\nCan't get orientation")
      print("\nGripper orientation:", orient)
```

Модуль для обработки фотографий

После получения всех снимков следует этап обработки изображений. При постановке кадра непосредственно над предметом проблем с распознаванием контуров не наблюдается. Главный контур, то есть искомый объект, выбирается среди прочих по двум критериям. В первую очередь, главный контур не касается границ изображения. Если и в таком случае контуров для выборки остается несколько, то выбирается больший по занимаемой на изображении площади. Контур, который остался в результате отбора – это неплотный набор точек на границах объекта (рис. 1).



а б в г

Рис. 1. Этапы обработки изображения: выделение всех контуров (а), поиск главного контура (б), смещение контура (в), облако точек объекта (г)

Для применения конечного алгоритма для изображений, необходимо перевести контур в маску, а точнее в облако точек. Для этого разработана функция, которая создает изображение с контуром, генерирует маску и для каждой белой точки маски добавляет элемент массива облака точек. Стоит учитывать, что точки(координаты) при работе с библиотекой OpenCV хранятся как массив двух значений в массиве в массиве остальных значений, а обычные двумерные массивы имеют только одну итерацию вложенности. В связи с этим построена система приведения контуров (массивов после обработки данных OpenCV) к массивам (для последующей обработки с помощью NumPy).

Модуль для решения задачи упаковки

Целью задачи упаковки является минимизация площади пустот [4]. С этой целью разработан алгоритм упаковки предметов в фигуру. Ниже представлена блок-схема разработанного алгоритма. Под смещением подразумевается перенос множества точек на фиксированное значение в выбранной оси. Размером объекта или фигуры является максимальное значение из множества точек по выбранной оси. Предполагается, что в первоначальном состоянии минимальные точки по обеим осям равны нулю (рис. 2).

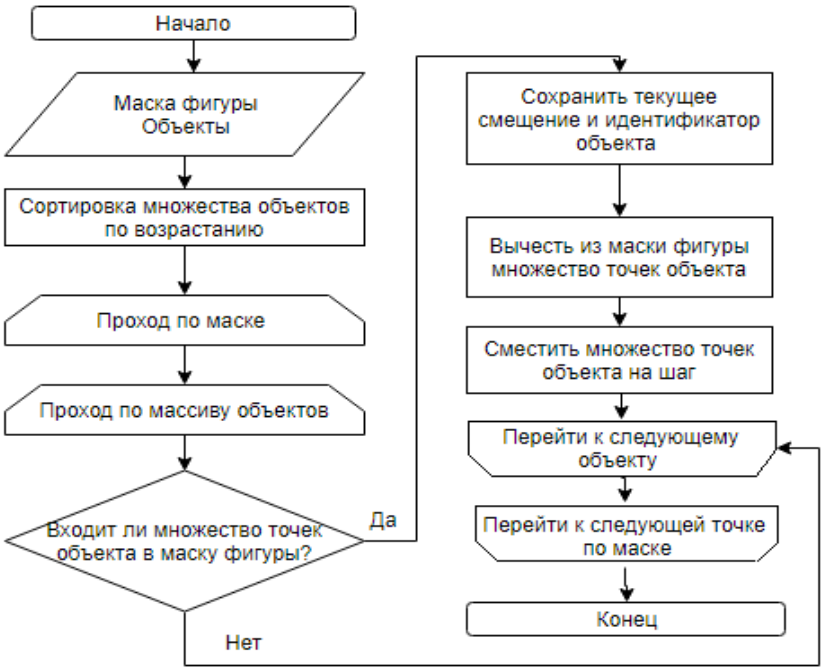


Рис. 2. Блок-схема алгоритма для упаковки

Запуск алгоритма осуществлялся для 5 различных объектов и 2 различных упаковок. По представленной таблице видно, что реализованный алгоритм не обладает максимальной плотностью. При фактическом применении такие незаполненные пространства позволяют упаковать объекты в дополнительную транспортную пленку, для избегания его повреждения во время перевозки (таблица).

Таблица

Результаты запуска разработанного алгоритма упаковки

Вид упаковки	Количество различных объектов	Перечень объектов	Процент занятого места	Процент незанятого места
Шестиугольник	3	«Шестеренка», «Круг», «Шестиугольник»	69.0	31.0
Шестиугольник	5	«Ель», «Сердце», «Шестеренка», «Круг», «Шестиугольник»	69.1	30.9
Овал	3	«Сердце», «Шестеренка», «Круг»	58.9	41.1
Овал	5	«Ель», «Сердце», «Шестеренка», «Круг», «Шестиугольник»	58.9	41.1

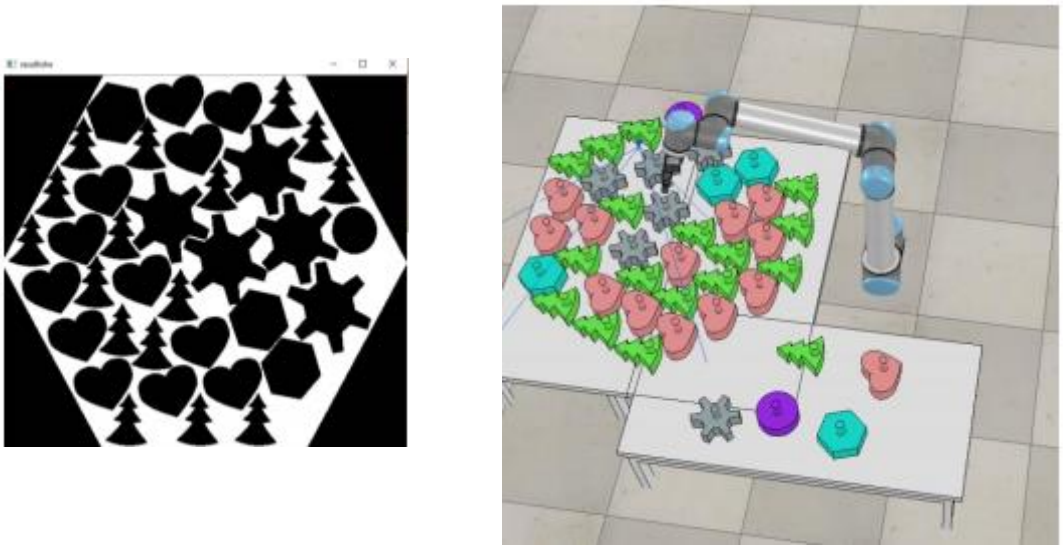
Результаты

Данное программное обеспечение разработано для решения задачи упаковки в фигуру непрямоугольной формы. На первом этапе пользователю необходимо запустить симулятор V-REP и разработанное программное обеспечение. После выбора соответствующего пункта меню пользователь получит возможность управлять симуляцией манипулятора и делать снимки с камеры на захвате. Далее пользователю демонстрируются результаты обработки снимков. Пользователь может повторить первый этап, если ни один из предметов не был распознан верно. Этот этап можно пропустить, если достаточно продемонстрировать работоспособность модуля распознавания изображений на заготовленных примерах

После успешного распознавания всех объектов, у пользователя появится возможность загрузить фотографию упаковки. Как и в предыдущем пункте, у него будет возможность ознакомиться с результатами распознавания. На следующем этапе работы применяется алгоритм заполнения предметами упаковки. После каждого “уложенного” предмета пользователь сможет увидеть промежуточный результат или отключить показатель прогресса и по окончании работ увидеть конечную укладку. По указанию пользователя манипулятор может начать выполнять автоматическую укладку в симуляторе.

В дальнейшем данное программное обеспечение может быть усовершенствовано следующими способами:

– уплотнение укладки с помощью приведения объектов к примитивным формам и использования типовых вариантов;
– создание графического интерфейса для работы с программным обеспечением;
– разработка модуля подключения к конкретному конечному устройству.



а) б)

Рис. 3. Результаты работы: алгоритма упаковки (а); манипулятора (б)

Выводы

Целью данной работы была разработка программного обеспечения для решения задачи упаковки объектов в фигуру непрямоугольной формы на конечном устройстве. В результате был создан и запрограммирован алгоритм для решения такой задачи. Разработанное программное обеспечение способно произвести необходимые математические операции, обработать исходную фотографию и сохранить ответ на компьютер пользователя. Эта программа решает достаточно нестандартную задачу без участия человека, а значит её можно применять для автоматизации упаковки заказов.

Литература

1. Автоматизация производства [Электронный ресурс]. Режим достуа: https://www.expocentr.ru/ ru/articles-of-exhibitions/ 2016/avtomatizaciyaproizvodstva/ (дата обращения 19.04.2020).
2. Роботы заменили 20 000 рабочих [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://habr.com/en/company/pochtoy/blog/429622/ (дата обращения 15.04.2020)
3. Remote API [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.coppeliarobotics. com/helpFiles/en/remoteApiOverview.htm (дата обращения 10.05.2020).
4. Про двумерную упаковку: offline алгоритмы [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://habr.com/en/post/136225/ (дата обращения 19.04.2020).

Степанова Мария Сергеевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
студент группы №V3436
направление подготовки: 12.03.03 – фотоника и оптоинформатика,
e-mail: mary.s.stepanova@gmail.com
Захаров Виктор Валерьевич
Год рождения: 1988
Университет ИТМО,
факультет фотоники и оптоинформатики,
к.ф.-м.н., ассистент,
e-mail: viktor-zah@yandex.ru

УДК 535.37

КОНФОКАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

М.С. Степанова
Научный руководитель – к.ф.-м.н. В.В. Захаров

Работа выполнена в рамках темы НИР №713561 «Оптические и электрические свойства гибридных наноматериалов на основе углеродных, полупроводниковых и металлических наноструктур».

Аннотация
Создан и продемонстрирован подход к изучению оптических свойств одиночных квантовых точек методом ЛСМ. Использование лазерной сканирующей микроскопии позволяет получить изображения фотолюминесценции одиночных полупроводниковых квантовых точек, которые демонстрируют эффект мерцания и обладают спектрами фотолюминесценции, зависящими от размера квантовой точки. Кроме того, было получено среднее время жизни фотолюминесценции отдельных квантовых точек, которое в два раза превышает среднее время жизни от ансамбля квантовых точек.
Ключевые слова
Лазерная сканирующая микроскопия, одиночные квантовые точки, фотолюминесценция, спектральный разброс, мерцание.

Квантовые точки (КТ) – относительно молодой объект исследования, который представляет из себя наночастицы полупроводникового материала, обладающие зависимым от размера энергетическим спектром. Они могут иметь различную размер и форму, но чаще всего это сферы диаметром 2-10 нм, движение носителей заряда в которых ограничено во всех трех измерениях [1]. Создание и изучение КТ является одной из перспективных областей развития нанотехнологий, поскольку КТ обладают широким спектром применений благодаря своим оптическим свойствам, таким как поглощение света в широком диапазоне длин волн при узкой линии эмиссии и зависимость длины волны фотолюминесценции (ФЛ) от размера частиц. Исходя из того, что КТ имеют дискретные атомно-подобные энергетические уровни следует, что они должны обладать узкими полосами ФЛ, спектральное положение которых зависит от размера нанокристалла. Однако, в действительности, поскольку в процессе синтеза КТ имеют дисперсию по размерам, различные размер и форма отдельных КТ в

ансамбле приводят к высокому неоднородному спектральному уширению [2]. В ансамбле могут присутствовать динамические и спектральные отклики одиночных нанокристаллов, но при усреднении они будут полностью скрыты. Таким образом, изучение фундаментальных физических свойств одиночных квантовых точек, таких как мерцание флуоресценции, спектральный разброс эмиссии и небольшая полуширина спектров, представляет особый интерес для потенциального применения одиночных КТ в оптоэлектронных устройствах и при создании люминесцентных меток в биологических системах.

Для того, чтобы устранить эффекты неоднородного уширения и усреднения по ансамблю, подобно одномолекулярной спектроскопии, используется спектроскопия одиночных наночастиц. Благодаря возможности регистрировать и отображать эмиссионные спектры от одиночных КТ, данный метод стал чрезвычайно успешен в получении новой информации из системы скопления квантовых точек. Кроме того, для более детального исследования поведения оптических свойств одиночных КТ могут применяться методы флуоресцентной микроскопии, либо комбинации с лазерным сканирующим конфокальным микроскопом [3]. Однако, зачастую используемый в работах подход содержит уникальные, сложно повторимые установки. Создание же общего подхода позволит упростить процесс получения практических результатов и изучения оптических свойств одиночных нанокристаллов, а также свести к минимуму неточности в ходе эксперимента. Учитывая отличную от органических люминофоров особенность ансамбля КТ, которая заключается в присутствии «темной фракции», при разработке подхода были поставлены следующие задачи: установить оптимальную поверхностную концентрацию нанокристаллов. Поскольку, с одной стороны, из-за дифракционного предела оптической системы для визуализации, расстояние между отдельными частицами не должно быть меньше определенного значения, которое зависит от числовой апертуры объектива и длины волны флуоресценции. С другой стороны, при наличии большого процента темной фракции в ансамбле поиск и регистрация сигнала флуоресценции от отдельных частиц могут быть затруднены. Следующая задача состоит в подборе плотности мощности возбуждающего излучения таким образом, чтобы при сканировании сфокусированным лазерным лучом не происходило уменьшение интенсивности флуоресценции вследствие деградации структуры квантовых точек. Но при этом соотношение сигнал/шум должно быть достаточным для достоверной регистрации сигнала от отдельных частиц.

Для достижения поставленной задачи были выбраны легированные полупроводниковые КТ $Cd_xZn_ySe_{x-1}S_{y-1}/ZnS$ градиентного типа благодаря их высокому квантовому выходу люминесценции (порядка 40%). КТ были получены методом коллоидного синтеза и обладают следующими оптическими характеристиками: максимум полосы фотолюминесценции в исходном растворе находится на длине волны 560 нм, полуширина спектра равна 55 нм. На рис. 1 представлены спектры поглощения и флуоресценции КТ в растворе гексана. В спектре поглощения КТ можно заметить отсутствие выраженного характерного экситонного пика, что обусловлено градиентной моделью выбранных КТ. Спектры поглощения и люминесценции исходного раствора нанокристаллов измеряли с использованием спектрофотометра Shimadzu UV3600 и спектрофлуориметра Cary Eclipse соответственно.

Подбор поверхностной концентрации осуществлялся созданием серии образцов из растворов с последовательным разбавлением. Контроль проводился с помощью атомно-силовой и электронной сканирующей микроскопии. Подготовка образца заключалось в следующем: исходный раствор был разбавлен гексаном таким образом, чтобы концентрация КТ составляла 10^{-12} моль/л. После чего 25 мкл полученного раствора было нанесено на покровное стекло микроскопа методом литья на вращающуюся подложку при скорости 1500 об/мин. Подтверждение поверхностной

концентрации полученного образца и определение размера наночастиц были проведены с использованием электронного сканирующего микроскопа Merlin (Zeiss). Изображение образца после нанесения раствора КТ демонстрирует низкую поверхностную концентрацию, которая составляет порядка 10 частиц на квадратный микрон (рис. 2а) и является достаточной для регистрации сигнала флуоресценции от одиночных КТ, так как расстояние между частицами превышает дифракционный предел. Разброс по размерам наночастиц составил от 7 до 12 нм. На следующем этапе приготовленный образец был исследован с помощью атомно-силовой микроскопии для получения профиля поверхностной концентрации и подтверждения размера наночастиц. На рис. 2б представлено объемное изображение поверхности образца, которое было получено с помощью атомно-силового микроскопа (Solver). Шкала справа соответствует высоте выступающего рельефа. Пространственный профиль поверхности (рис. 2в) построен вдоль линии, выделенной на рис. 2б, и показывает, что в образце, помимо одиночных КТ (первый пик высотой 8 нм), присутствуют и скопления квантовых точек (следующий высокий пик). Также был измерен аксиальный размер нанокристаллов. В среднем он составил от 7 до 12 нм.

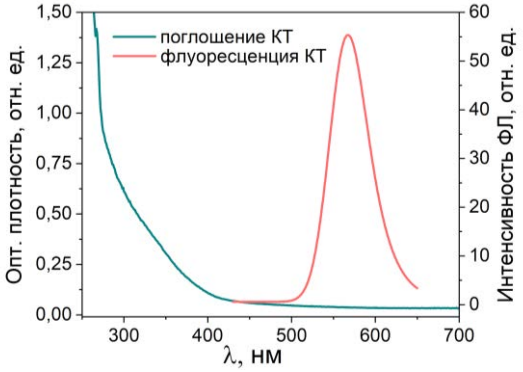


Рис. 1. Спектры поглощения и флуоресценции $Cd_xZn_ySe_{x-1}S_{y-1}/ZnS$ квантовых точек в растворе гексана

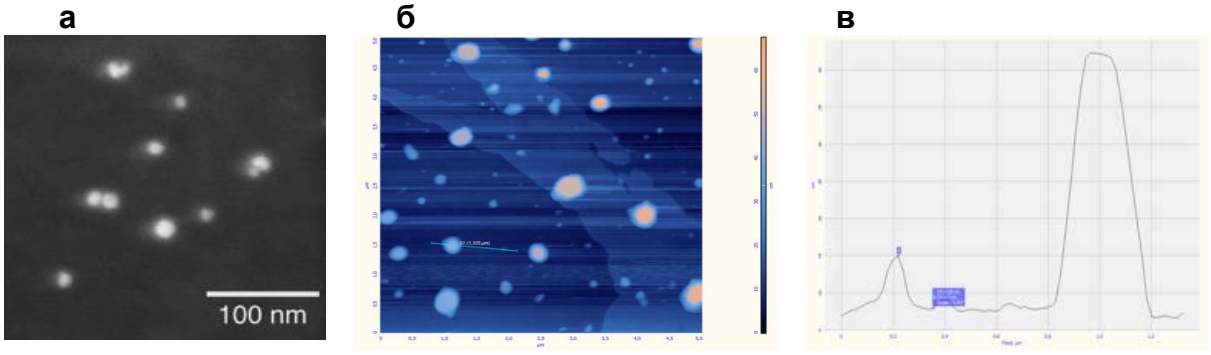


Рис. 2. Изображение квантовых точек $Cd_xZn_ySe_{x-1}S_{y-1}/ZnS$, полученное сканирующим электронным микроскопом (а), объемное изображение поверхности образца (б) и пространственный профиль, построенный вдоль линии (в)

Регистрация флуоресцентного сигнала и измерения локальных спектров флуоресценции образца осуществлялись с помощью лазерного сканирующего флуоресцентного микроскопа с конфокальной фильтрацией сигнала LSM 710 на базе прямого штатива Axio Imager Z1 (Carl Zeiss). Помимо того, что лазерная сканирующая конфокальная микроскопия (ЛСКМ) позволяет получать изображения с высоким

соотношением сигнал/шум, которое достигается за счет применения сканирования лазерным лучом и конфокальной фильтрации флуоресцентного сигнала, был использован высоко апертурный объектив (Zeiss Epiplan-Apochromat 50×/0,95) для улучшения пространственного разрешения. Кроме того, при измерениях флуоресцентного сигнала диаметр конфокальной диафрагмы был выбран меньше единицы Эйри, что позволило точнее определить локализацию флуоресцентного сигнала. В качестве источника возбуждения использовался диодный лазер с длиной волны 405 нм. Плотность мощности излучения, исходя из вышеперечисленных задач, была подобрана таким образом, чтобы достоверно детектировать сигнал от отдельных КТ и не приводить к значительным изменениям в интенсивности люминесценции при длительном сканировании. Она составила 1,6 КВт/см^2. На рис. 3а представлено спектральное изображение образца, полученное с помощью лазерной сканирующей конфокальной микроскопии, где размер области составляет 5x5 мкм. Визуализация флуоресценции демонстрирует разброс спектральных линий от одиночных КТ. Флуоресцентное изображение было получено многоканальным детектором при накоплении сигнала в течение 20 минут. Локальные спектры ФЛ были получены для нескольких отдельных областей, которые предположительно представляют собой одиночные КТ, и для области в целом. На рис. 3б чёрная линия соответствует спектру ФЛ со всей области, а сигнал от отдельных частиц представлен цветными линиями, соответствующие регионы с зелёным, жёлтым и оранжевым излучением выделены на рис. 3а. Для сравнения в таб. 1 приведены такие оптические характеристики, как полуширина и положение максимума спектров ФЛ для области в целом и для каждого из регионов.

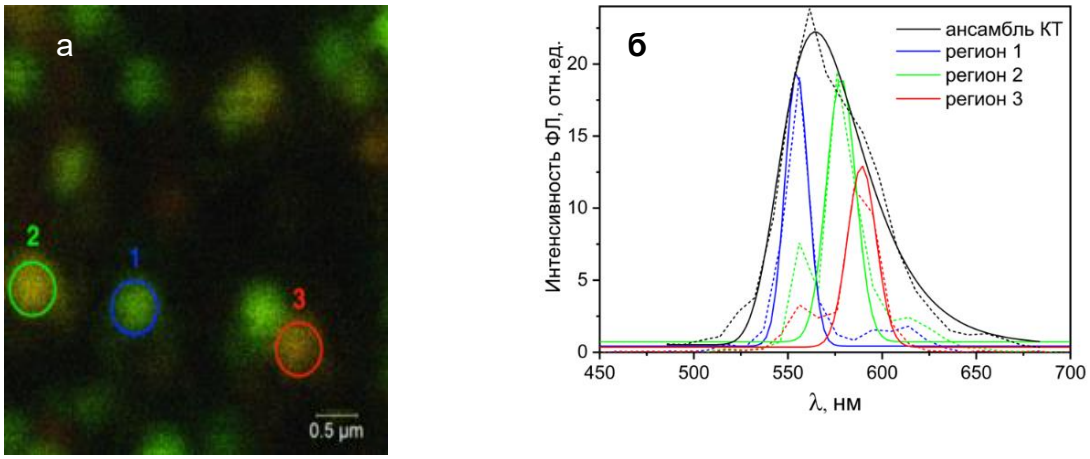


Рис. 3. Флуоресцентное изображение образца размером 5x5 мкм с низкой концентрацией КТ (а) и спектр ФЛ со всей области (чёрная линия) и локальные спектры ФЛ (цветные линии) выделенных слева областей (б)

Таблица 1

Оптические характеристики области в целом и отдельных регионов

	Среднее по области	Регион 1	Регион 2	Регион 3
Полуширина	55±1,1 нм	14±1,2 нм	17±1,7 нм	19±1,3 нм
Максимум	560±0,8 нм	554±0,4 нм	578±0,8 нм	589±0,5 нм

Небольшая полуширина спектров ФЛ регионов относительно области в целом и

различные положения максимумов ФЛ регионов позволяет предположить, что регионы относятся к одиночным КТ. Спектр флуоресценции, усредненный по ансамблю, аналогичен огибающей спектров одиночных нанокристаллов.

Времена жизни флуоресценции являются важной оптической характеристикой, так как дают информацию о физических процессах, протекающих в возбужденном состоянии, и позволяют детально исследовать взаимодействие КТ с их окружением. Измерения времен энергетической релаксации электронных возбуждений КТ в полученных образцах проводились при помощи техники время-коррелированного счета одиночных фотонов, которая лежит в основе конфокального флуоресцентного микроскопа с временным разрешением MicroTime-100 (PicoQuant) на базе прямого штатива Olympus. В качестве источника возбуждающего излучения использовался импульсный диодный лазер с длиной волны 405 нм. Для детектирования низкого сигнала флуоресценции был применен сверхчувствительный приемник, который представляет из себя гибридный детектор из диода и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Принципиальное отличие данного детектора от ФЭУ заключается в улучшенном разрешении по времени и, главное, в увеличении максимальной эффективности обнаружения, то есть чувствительности, что является важным для регистрации низких интенсивностей ФЛ. На время-разрешенном флуоресцентном изображении (рис. 4а) выделенные области относятся к одиночным КТ, так как имеют неоднородную интенсивность флуоресценции, что выражается светлыми и темными полосами. Такое поведение обусловлено эффектом мерцания присущим одиночным КТ. На рис. 4б приведены кривые распада ФЛ одиночных КТ (оранжевая и зелёная линии), которые демонстрируют более пологий спад, чем распад ФЛ от ансамбля (красная линия).

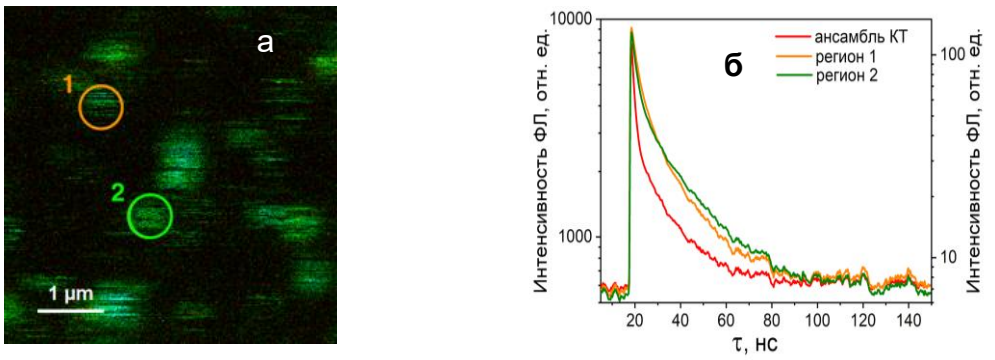


Рис. 4. Время-разрешенное флуоресцентное изображение нанокристаллов (а) и кривые распада ФЛ (б) от отдельных регионов и области в целом

При обработке полученных кривых затухания ФЛ было рассчитано время жизни ФЛ от ансамбля и от одиночных КТ аппроксимацией по двум экспонентам с учётом приборной функции. Приборная функция учитывает любые внешние воздействия и внутренние помехи, которые могли возникнуть в ходе эксперимента. В таб. 2 приведены составляющие амплитуд и времена, а также среднее время жизни ФЛ образца. При этом можно выделить времена жизни ФЛ для области в целом и для отдельных регионов, они составляют 4 нс и 8 нс соответственно. Подтверждением того факта, что в образце присутствуют скопления квантовых точек, является меньшее время жизни ФЛ от образца в целом, относительно одиночных квантовых точек, поскольку увеличивается доля безызлучательных переходов.

Таблица 2

Время жизни ФЛ области в целом и отдельных регионов

	A_1, *отн.ед.*	t_1, *нс*	A_2, *отн.ед.*	t_2, *нс*	$t_{ср}$, *нс*
Среднее по области	3,3	14,0±0,3	13	1,3±0,2	3,9±0,5
Регион 1	0,09	15,0±2,4	0,14	2,9±0,8	7,8±0,8
Регион 2	0,1	19,0±1,3	0,2	2,2±0,7	8,1±1,4

При изучении приготовленного образца лазерной сканирующей конфокальной микроскопией был обнаружен эффект мерцания квантовых точек. Мерцание, или термин, принятый в англоязычной литературе – blinking – это необычное свойство одиночных КТ, которое заключается в чередовании интервалов яркой ФЛ – светлых состояний, с интервалами слабой ФЛ – темными состояниями. На рис. 5 представлены отдельные кадры из временной серии, записанные с частотой 1 кадр в секунду. При регистрации кадров с указанной частотой возможно отслеживать времена темных и светлых состояний. Поскольку для поддержания высокой частоты записи временной серии отсутствует возможность накапливать сигнал, диаметр конфокальной диафрагмы был выбран больше единицы Эйри, что позволило увеличить детектируемый сигнал флуоресценции. На картине распределения флуоресценции во времени выделено два квадрата, нижний для сравнения демонстрирует стабильное излучение, в то время как верхний – сильные флуктуации интенсивности флуоресценции, что может быть интерпретировано как мерцание.

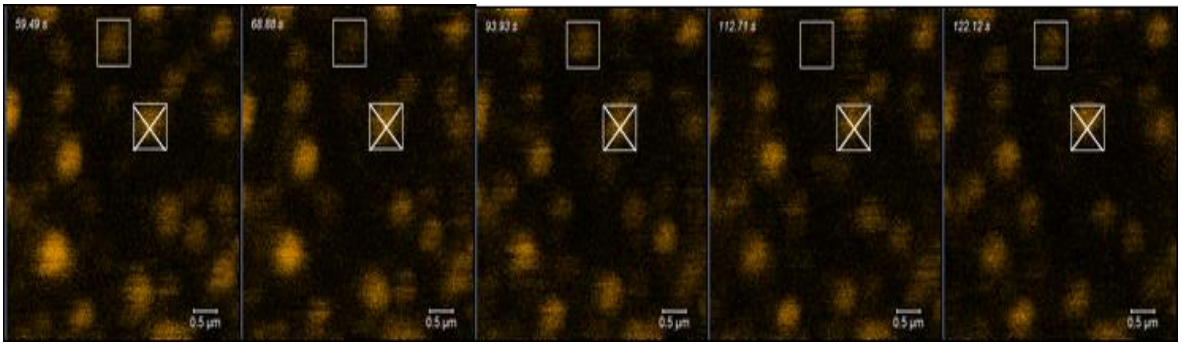


Рис. 5. Эффект мерцания одиночных КТ, когда интенсивности флуоресценции изменяется во времени (верхний квадрат) на фоне стабильного излучения (нижний квадрат)

Характерный трек флуоресценции КТ, полученный с помощью время-разрешенной микроскопии, представлен на рис. 6а, где видно, как темное состояние сменяется светлым, причем временные интервалы разной длительности. Рис. 6б демонстрирует зависимость интенсивности флуоресценции от времени, полученную с помощью ЛСКМ, для участков с одиночными КТ (номер 1) и их скоплением (номер 2). В треке флуоресценции под номером 1 также можно заметить провал в интенсивности ФЛ – темное состояние, и последующий переход в светлое состояние с прежней интенсивностью, за исключением общего уменьшения интенсивности ФЛ. Запись временной серии подразумевает высокий уровень лазерного воздействия на образец, что может привести к уменьшению интенсивности флуоресцентного сигнала. Регистрация 150 кадров при плотности мощности возбуждения 1,6 КВт/см^2, достаточна для отслеживания времен темных и светлых состояний, при этом интенсивность люминесценции уменьшается всего в 2 раза. Такой уровень люминесцентного сигнала остается достаточным для наблюдения мерцания одиночных КТ.

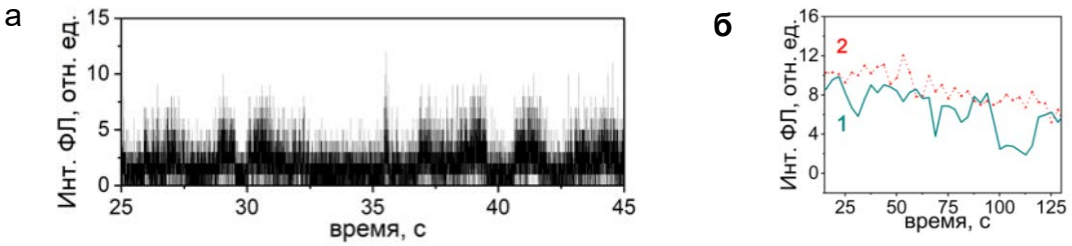


Рис. 6. Характерный трек флуоресценции квантовой точки (а)
и временная зависимость интенсивности ФЛ из временной серии кадров (б)

Наблюдаемый эффект мерцания у градиентных квантовых точек не может объясняться механизмом оже-ионизации на границе ядро/оболочка, поскольку такие структуры не имеют выраженной границы. Для объяснения наблюдаемого эффекта мерцания в таких квантовых точках была выбрана модель, основанная на фотоиндуцированной локализации носителей заряда на поверхностных дефектах нанокристалла. Наличие дефектов кристаллической решётки создаёт «ловушки» (trap states) для электронов (дырок), что препятствует излучательной рекомбинации экситона (рис. 7) [4].

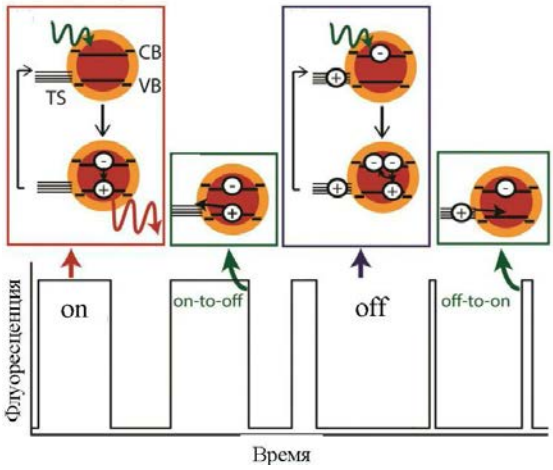


Рис. 7. Схематическое пояснение механизма мерцания квантовых точек [4]

Таким образом, был разработан подход к исследованию оптических свойств одиночных нанокристаллов методом лазерной сканирующей микроскопии, который заключается в подборе оптимальной поверхностной концентрации нанокристаллов, которая составила 10 частиц на квадратный микрон при квантовом выходе люминесценции 40%. Установлено, что при регистрации 150 кадров с плотностью мощности возбуждающего излучения 1,6 КВт/см^2 существенной фотодеградации структуры КТ не происходит. Предложенный подход, опробованный на полупроводниковых КТ $Cd_xZn_ySe_{x-1}S_{y-1}/ZnS$ градиентного типа размером 7-12 нм, позволяет зарегистрировать спектральные и динамические отклики от одиночных КТ, которые проявляются в спектрах ФЛ, временах жизни ФЛ и временных сериях флуоресцентных изображений, и соответствуют следующим признакам, характеризующим одиночные КТ: небольшая полуширина спектров ФЛ регионов относительно ансамбля и различные положения максимумов ФЛ регионов; время жизни ФЛ регионов в два раза превышающее время жизни ФЛ от ансамбля; неоднородные флуктуации интенсивности ФЛ регионов, обусловленные эффектом мерцания; Все вышеперечисленные признаки, характеризующие поведение регионов, позволяют утверждать, что мы наблюдаем одиночные КТ. Дальнейшее развитие

заключается в определении границ применимости предложенного подхода. Также интерес для изучения представляет анализ статистики мерцания квантовых точек при различных внешних условиях.

Литература

1. Олейников В.А. Квантовые точки в биологии и медицине // Природа. 2010. №. 3. С. 22-28.
2. Empedocles S.A. et al. Photoluminescence from single semiconductor nanostructures // Advanced Materials. 1999. Т. 11. №. 15. С. 1243-1256.
3. Michalet X. et al. Ultrahigh-resolution multicolor colocalization of single fluorescent nanocrystals //Nanoparticles and Nanostructured Surfaces: Novel Reporters with Biological Applications. – International Society for Optics and Photonics. 2001. Т. 4258. С. 8-15.
4. Гвоздев Д.А. Фотосенсибилизирующие свойства гибридных комплексов фталоцианинов и флуоресцентных наночастиц: дис. на соиск. уч. степ. канд. б. наук: 03.01.02. Москва. 2019. 148 с.

Уткин Филипп Ростиславович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
студент группы №K3420,
направление подготовки: 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии
и системы связи,
e-mail: philipp98yt@gmail.com

Иванов Сергей Евгеньевич
Год рождения: 1975
Университет ИТМО,
факультет инфокоммуникационных технологий,
к.ф-м.н., доцент,
e-mail: sivanov@mail.ifmo.ru

УДК 004.04

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ API С УСКОРЕНИЕМ ОБРАБОТКИ ЗАПРОСОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Ф.Р. Уткин
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент С.Е. Иванов

Аннотация
В работе рассмотрен вопрос вынесения слоя логики взаимодействия мастер-системы с клиентскими системами в отдельное приложение и применение в нем технологий NoSQL баз данных с использованием in-memory кеширования с целью сокращения времени обработки запроса на получение данных в условиях высокой нагрузки на веб-сервис, а также построения приложения на основе архитектуры REST, что позволяет обеспечить унифицированный, удобный и гибкий APIинтерфейс.

Ключевые слова
Распределенные системы, кеширование, NoSQL, веб-сервисы, REST, высоконагруженные системы.

На сегодняшний день, в связи с развитием современных технологий и беспроводных сетей Интернет, замечено увеличение доли пользователей Интернет с мобильных устройств, которая составила 48% (рис. 1). Данный рост в корне изменил способы взаимодействия клиентов с операторами связи, т.к. для поддержания конкурентоспособности оператору связи требуется предоставить версии различных сервисов. Все они расположены на различных платформах, но взаимодействуют с одной мастер-системой. Со всеми созданными оператором связи мобильными приложениями, веб-сайтами и приложениями на телевизионных приставках учащается взаимодействие клиентов с системой, что вызывает повышенное количество запросов в мастер-систему и, соответственно, высокую нагрузку на нее. В данной ситуации среднее время ответа на запрос становится чрезмерно большим.

Более того, все выше указанные клиентские приложения не всегда разрабатываются в одно время или одной командой разработчиков. В связи с этим возникает необходимость создания единого и изменяемого интерфейса API, который позволит конечным приложениям общаться с мастер-системой, с легкостью

присоединять новых потребителей API и гарантировать стабильность уже налаженных взаимодействий.

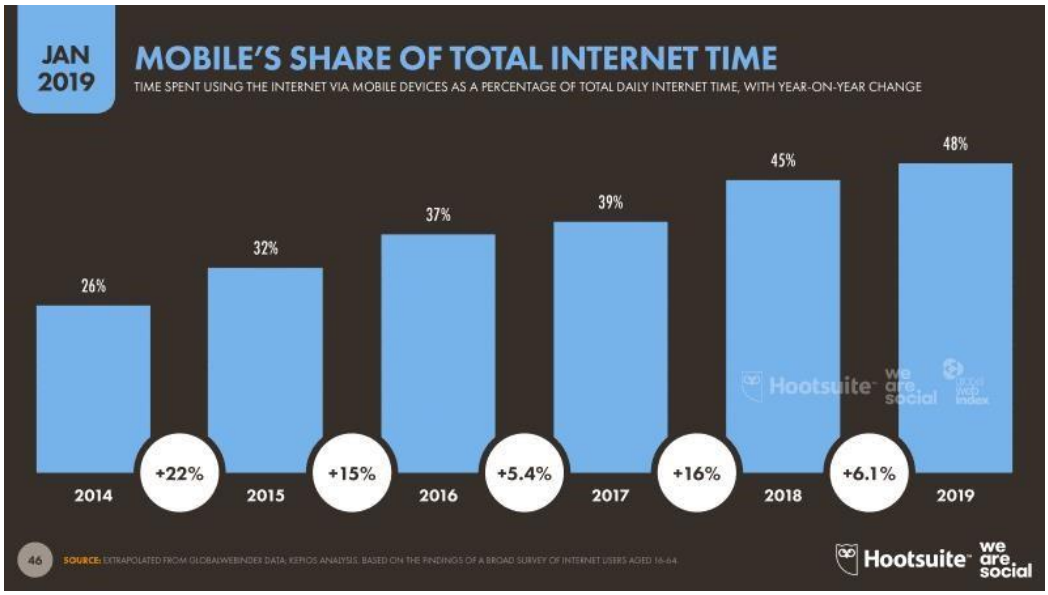


Рис. 1. Рост доли пользователей Интернет с мобильных устройств

Данные проблемы возможно решить перестройкой существующей архитектуры enterprise-приложения с целью обеспечения взаимодействия со множеством клиентских систем. Однако эта задача является комплексной и не имеет однозначного решения, т.к. логика API-интерфейсов будет находится сразу во многих модулях мастер-системы, и какие-либо изменения в модели данных или в бизнес-логике непосредственно влияют на API.

Тема высоконагруженных систем активно рассматривается в современной научной литературе. В ней уделяется внимание по большей части вопросам оптимизации реляционных систем управления базами данных (с помощью различных методов масштабирования) [1] или проблематике применения баз данных NoSQL класса [2]. Оптимизация реляционных систем управления базами данных является дорогостоящим и тяжело реализуемым решением, т.к. использующие шардинг системы сложно поддерживать. При этом применение репликации серверов в разы увеличивает расходы на оборудование, не повышая при этом производительность.

Практически невозможным представляется и перевод крупной enterprise-системы целиком на NoSQL базу данных. У БД такого класса есть свои недостатки, среди которых – отсутствие транзакционности – свойство, которое является критически важным, например, для финансовых операций. Оба эти решения имеют также свои преимущества при решении отдельно взятого круга задач. Однако, вопрос применения данных технологий вместе слабо освещен в научной среде.

Вместе с этим большое количество научных публикаций посвящено вопросу соблюдения правил архитектурного стиля REST в веб-сервисах [3]. Согласно им, веб-сервис, API-интерфейс которого должен быть гибким, легко масштабируемым, удобным и понятным для потребителей (клиентских приложений), должен соответствовать данному архитектурному стилю.

Таким образом, особенностью разрабатываемого прототипа приложения является его роль в виде промежуточного слоя между мастер-системой и пользовательскими приложениями, благодаря чему изменения в уже существующую систему станут незначительны. При этом прототип построен с использованием NoSQL базы данных,

достоинства которой заключаются в скорости обработки и высокой доступности при запросах на чтение. При запросах на запись данных, где требуется высокая надежность и транзакционность, запросы поступают в мастер-систему, использующую реляционную СУБД. В итоге, прототип является решением комплексной проблемы предоставления внешних интерфейсов для enterprise-системы телеком-оператора, используя симбиоз NoSQL баз данных и реляционных СУБД, что позволит ускорить среднее время обработки запроса в условиях высокой нагрузки. Наконец, применение архитектуры REST при разработке данного прототипа позволяет обеспечить стабильное взаимодействие с ним любой конечной системе.

Для решения обозначенных выше проблем, были сформулированы следующие задачи:

1) исследовать методы решения проблемы высокой нагруженности в вебсервисах;
2) сравнить технологии NoSQL баз банных в качестве слоя кеширования и реляционные СУБД в условиях высоких нагрузок;
3) исследовать требования REST API и определить преимущества использования данной архитектуры в разрабатываемом приложении;
4) определить и проанализировать функциональные возможности разрабатываемого приложения;
5) на основе анализа функциональных возможностей выбрать технологии для разработки прототипа приложения и реализовать его;
6) провести нагрузочные тесты до и после внедрения прототипа.

В ходе изучения способов решения проблемы высокой нагруженности были рассмотрены методы масштабирования реляционных баз данных (шардинг и репликация), а также использование NoSQL баз данных с применением технологий кеширования. При их сравнении был сделан вывод, что с преодолением определенного порога по количеству запросов за единицу времени процесс масштабирования реляционных БД становится сложным и затратным по времени и финансово невыгодным в связи с необходимостью закупки аппаратного обеспечения. Более того, слой работы с многочисленными БД в приложении становится тяжело поддерживаемым из-за большого количества соединений.

В то же время NoSQL базы данных при большом количестве запросов могут иметь проблемы с целостностью данных между несколькими репликами ввиду отсутствия тразакционности. Именно поэтому для решения проблемы высокой нагруженности на чтение было решено использовать NoSQL базу с применением кеширования, а для запросов на чтение обращаться к мастер-системе, которая работает с базой данных реляционного типа.

Для предоставления удобных унифицированных внешних интерфейсов при построении веб-части было решено использовать архитектуру REST, основные требования которой таковы: применение клиент-серверной архитектуры и принципа отсутствия состояния сервера между запросами, кеширование на уровне приложения, разделение логики приложения на слои и унифицирование интерфейсов API. Следовательно, преимуществом архитектуры REST является создание следующего сервиса: масштабируемого, производительного, гибкого и удобного для внесения изменений и добавления новых версий API, а также для создания конечных приложений (что позволит ускорить процесс разработки и интеграции, а, следовательно, и сэкономить затраченные финансы).

Были определены функциональные возможности приложения: предоставление внешних интерфейсов и сохранение их неизменного состояния, согласно контракту; преобразование модели данных из формата мастер-системы в формат, требуемый клиентскими приложениями, и сохранение их в кеше; повышение отказоустойчивости

решения. В результате, было реализовано приложение с учетом данных функциональных возможностей, что позволило решить проблему высокой нагруженности и обеспечения унифицированного интерфейса для клиентских приложений.

После формирования функциональных требований к приложению, были выбраны технологии для создания прототипа. Приложение было реализовано на основе фреймворка Spring, который обеспечивает основную инфраструктурную часть, а также позволяет (по мере необходимости) добавлять различные модули, что упрощает процесс разработки. Более того, была разработана модель данных, описывающая клиента, а также endpoint (конечная точка) REST API-интерфейса, позволяющая создавать новых пользователей и находить существующих. Была установлена и настроена NoSQL база данных Couchbase [4], в которую сохраняется информация о клиенте.

Для сравнения производительности системы до и после разработки и внедрения прототипа были проведены нагрузочные тесты, позволяющие сэмулировать нагрузку на конечные точки веб-сервиса. Мастер-система до внедрения прототипа была смоделирована на основе фреймворка Spring с использованием реляционной базой данной данных. В первом тесте запрос шел на приложение с реляционной базой данных, во втором случае – прототип с использованием NoSQL базы данных с технологией In-Memory кеширования [5].

В результате был разработан прототип, позволяющий вынести слой API и логику взаимодействия с клиентскими приложениями из мастер-системы в отдельное приложение. Оно построено в соответствии с требованиями архитектуры REST и обладает следующими свойствами: масштабируемость, гибкость, распределенность и интуитивность интерфейсов. По результатам нагрузочных тестов можно сделать вывод, что применение NoSQL решения для кеширования запросов на уровне приложения позволило снизить время обработки запроса в среднем на 19% (рис. 2, 3).

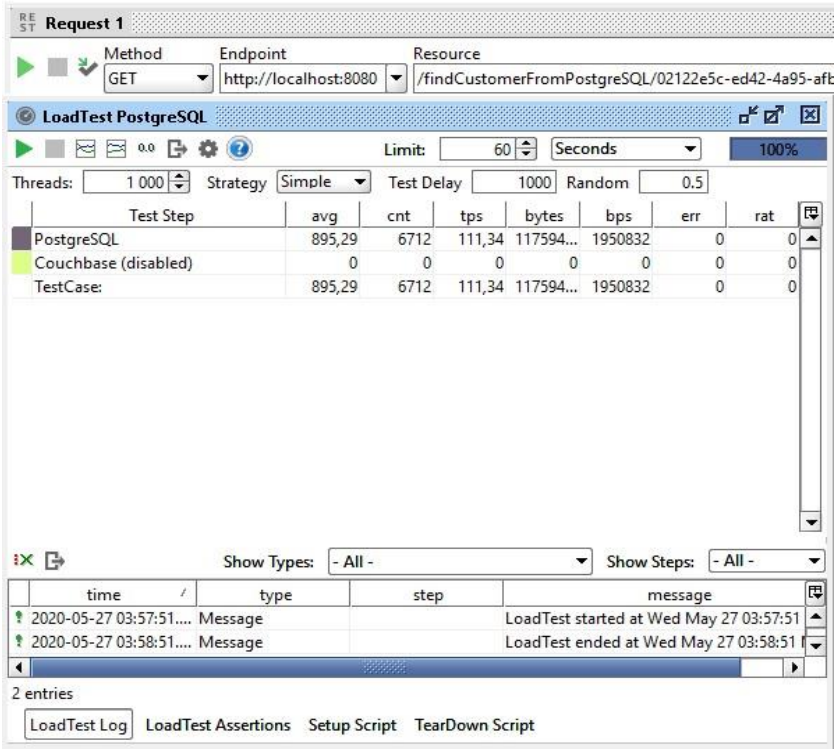


Рис. 2. Нагрузочный тест мастер-системы до использования прототипа

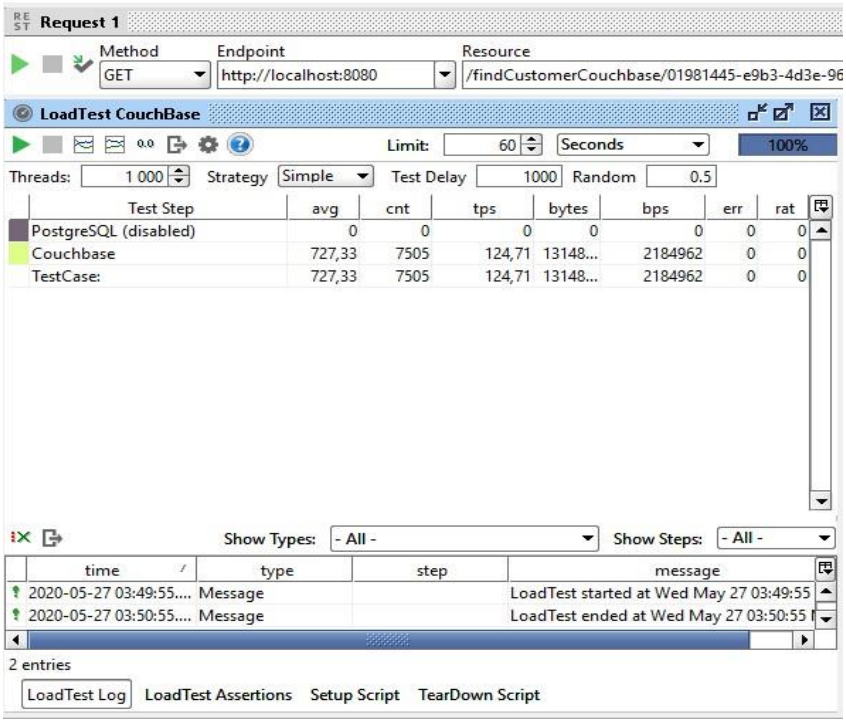


Рис. 3. Нагрузочный тест мастер-системы с использованием прототипа

Соответственно, дальнейшим направлением развития проблемы можно считать вопрос обеспечения режима высокой доступности при ситуациях, когда сервера мастер-системы выходят из строя. Можно также обеспечить подключение данного прототипа и к основной реляционной базе данных, чтобы оно имело доступ к ней в обход мастер-системы. Стоит отметить, что подобные сценарии, касаются лишь запросов на получение данных, но не на их изменение. При успешной реализации данного функционала приложение получит повышенную доступность, и у всей системы возврастет отказоустойчивость.

Литература

1. Чистов В.А., Лукьянченко А.В. Автоматизация масштабирования высоконагруженных баз данных MySQL [Текст] // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6 (2). С. 315-319.
2. Băzăr C., Iosif C.S. The transition from rdbms to nosql. A comparative analysis of three popular non-relational solutions: Cassandra, mongodb and couchbase // Database Systems Journal. 2014. no. 5 (2). P. 49-59.
3. Fielding R.T., Richard N.T. Architectural styles and the design of network-based software architectures. Irvine: University of California, Irvine, 2000. Vol. 7. BoostR Ch. 5.
4. Borkar D., Mayuram R., Sangudi G., and Carey M.J. Have your data and query it too: From key-value caching to big data management // In Proc. ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data. 2016. June. P. 239 – 251.
5. Булов А.А., Булов, А.А. Применение программы memcached для оптимизации системы интранета судоходной компании [Текст] // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. 2011. № 4 (12). С. 91–92.

Фьерро Нуньес Хасмин Кристина
Год рождения: 1997
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы № B3416,
направление подготовки: 09.03.03 – Прикладная информатика,
e-mail: jazmincfn@outlook.es
Волынский Максим Александрович
Год рождения: 1987
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н., доцент,
e-mail: maxim.volynsky@itmo.ru

УДК: [528.854+004.032.26]:631.589

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ СРЕДОЙ

Х.К. Фьерро Нуньес
Научный руководитель – к.т.н., доцент М.А. Волынский

Аннотация
В работе выполнено сравнительное исследование методов обработки, распознавания и классификации изображений листьев растений и разработана автоматическая система анализа изображений растений на основе алгоритмов машинного обучения для оценки эффективности управления синтетической растительной средой.
Ключевые слова
Компьютерное зрение, обработка изображений, классификация изображений, свёрточная нейронная сеть, машинное обучение, искусственный интеллект, набор данных, растение, фитопатологии, синтетическая растительная среда.

Автоматизированные системы, объединяющие в себе такие науки, как биология, биометрия, искусственный интеллект и компьютерное зрение, могут успешно использоваться для оценки эффективности синтетических растительных сред. Эффективность данных сред оценивается качественно и количественно, так как продукция зависит от качества здоровья растений. Для поддержания оптимального качества здоровья растений необходим постоянный контроль в синтетической растительной среде, начиная с самых ранних стадий роста растений. Таким образом, возникает проблема, решение которой требует много трудовых и финансовых ресурсов, а результаты использования этих ресурсов могут быть дорогостоящими и неточными.

Последние технические достижения и резкое сокращение затрат в области получения цифровых изображений позволили внедрить на практическом уровне целый ряд методов диагностики заболеваний растений на основе анализа их изображений. Тем не менее, полученная информация об изображении включает в себя сжатые данные, которые трудно обработать компьютеру, потому что он требует предварительной обработки шагов для извлечения определенных объектов, таких как форма и цвет, которые задаются вручную. Именно эти причины побуждают использовать алгоритмы машинного обучения, которые автономно изучают подходящие признаки для классификации, не полагаясь на вмешательство человека.

LeafSnap [1] и LeafNet [2] являются существующими решениями, основанными на алгоритмах машинного обучения, которые позволяют автоматически идентифицировать виды растений на основе изображений. Недостатки данных решений заключаются главным образом в том, что они были разработаны с дидактическими целями, и поэтому проблема, на решение которой они ориентированы, заключается только в выявлении видов растений, а не в оценки состояния их здоровья.

В данной работе изучаются автоматизированные системы на основе алгоритмов машинного обучения и свёрточных нейронных сетей, предназначенные для обеспечения контроля качества растений в синтетических средах, а также различные методы предварительной обработки изображений для извлечения ключевых признаков с целью определения здоровья растений и поддержания стабильного объёма выпуска годной продукции.

Для этой работы были использованы два источника данных. Первым источником был интернет с наборами данных PlantVillage [3] и LeafSnap [1]. Второй источник состоял из изображений различных видов сельскохозяйственных культур в синтетических растительных средах, собранных вручную и предоставленных специально для этого проекта анонимными сборщиками информации. Весь набор данных состоит примерно из 70 000 изображений более 400 видов и подвидов различных растений.

Предварительная обработка изображений проводилась в четыре этапа: представление изображения в цветовой модели HSI, извлечение текстурных признаков, извлечение характеристики формы на основе кривизны, удаление ложноположительных результатов.

В рамках представления изображения в цветовой модели HSI выполняется преобразование входных изображений из собранного набора данных из цветовой модели RGB в модель HSI, что позволяет отделить хроматическую информацию (тон) от насыщенности и интенсивности изображения, как показано на рис. 1.

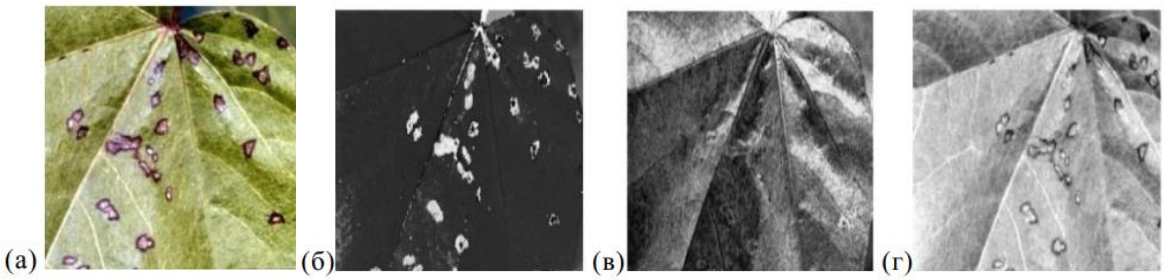


Рис. 1. Исходное цветное изображение (а) и компоненты его полутонового представления в цветовой модели HSI: тон (б), насыщенность (в) и интенсивность (г)

После перехода в цветовую модель HSI вычисляется цветовая гистограмма

$$\mathrm{H} = \frac{\{h[1],h[2],\ldots,h[c],\ldots,h[n]\}}{XY}, \quad (1)$$

где $h[c]$ – количество пикселей с заданными значением тона, указанным в квадратных скобках, n – количество столбцов в гистограмме, X, Y – количество пикселей в изображении по горизонтали и по вертикали, соответственно.

Чтобы обобщить размер векторов признаков, были определены центральные моменты

$$c_0 = \sum_{i=0}^{m-1} h(x_i)\,, \tag{2}$$

$$c_1 = \sum_{i=0}^{m-1}\left(x_i - \sum_{i=0}^{m-1}(x_i)h(x_i)\right)h(x_i), \tag{3}$$

где для каждого m = 0, 1, 2…, $h(x_i)$ – нормализированная гистограмма, x_i – уровень серого тона пикселя. Данный метод был применён для работы с EM-алгоритмом (*Expectation Maximization*). Вероятность распределения пикселя x, представленного его насыщенностью и значением, моделируется суммой двух гауссовских функций

$$\mathrm{p}(x|\Theta) = \sum_{k=1}^{2} \frac{1}{2}\mathrm{p}(x|\beta_k, \Sigma), \tag{4}$$

где каждая вероятность $\mathrm{p}(x|\beta_k, \Sigma)$ для пикселя x, представленная его насыщенностью и интенсивностью, является гауссовской функцией со средним значением β_k и общей дисперсией Σ. Полным набором данных с параметрами является $\Theta = \{\beta_1, \beta_2 \ldots, \beta_k, \Sigma\}$. Кластеризация пикселей выполняется только в пространстве значений насыщенности и интенсивности (*Saturation, Intensity*), поскольку оттенок имеет зелёную компоненту, отражающуюся от листа растения.

Для извлечения текстурных признаков была использована матрица смежности серого тона, которая учитывает пространственные отношения между пикселями. Матрица смежности серого тона **C**(*i, j*) состоит из полутоновых пикселей со значениями *i, j* на расстоянии

$$\mathrm{C}(i,j) = \mathrm{cord}\left\{\begin{matrix}\big((x_1,y_1),(x_2,y_2)\big) \in (XY)\times((XY) \text{ при } f(x_1,y_1)=i, f(x_2,y_2)=j) \\ (x_2,y_2) = (x_1,y_1) + (D\cos\theta\,, D\sin\theta) \text{ при } 0<i, \qquad j>N\end{matrix}\right\}, \tag{5}$$

где D – расстояние в полярных координатах (D, θ), cord – количество изображения в наборе данных. Вычислительная сложность зависит от размерности матрицы смежности, которая равна $N \times N$, а также от количества полутонов, используемых для квантования.

Определение вида растений было реализовано с помощью извлечения характеристики формы на основе кривизны. Преимуществом данного метода является его инвариантность к вращению и масштабированию. На рис. 2 видно, что кривизна в двумерном изображении представлена пересечением диска, центрированного в точке контура, и внутренней части контура. Для границ, которые являются выпуклыми, прямыми и вогнутыми, доля пересекаемого диска будет меньше, равна или больше 0,5 соответственно.

Стоит обратить внимание на возможную разницу размера векторов признаков при существовании разных типов краев листьев. Чтобы избежать данной проблемы, были рассчитаны гистограммы кривизны по масштабу путём преобразования изображений в полярные координаты. Каждая строка данного изображения содержит интегральные меры кривизны во всех масштабах для одной точки контура.

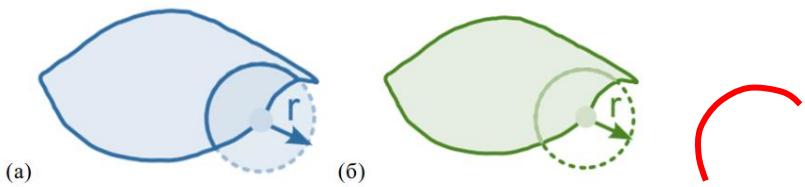


Рис. 2. Иллюстрация к расчету значения кривизны через измерение площади окружности (а) или через измерение длины дуги внутри объекта (б)

Последним этапом обработки изображений является удаление ложноположительных результатов. Ложноположительные результаты- тени, стебли и прочие загрязнения фона, которые могут появиться на изображениях. Чтобы избежать влияния этих ложноположительных результатов на процесс классификации изображений, были вычислены связанные компоненты на расширенной версии сегментации. Любые связанные компоненты с большой площадью на границе изображения исключаются, кроме фона. Предполагается, что самый крупный из оставшихся компонентов является частью листа.

Для удаления стебля определяется набор всех тонких структур, выступающих из листа с помощью *top-hat* преобразования

$$T(B) = B - B \circ E, \tag{6}$$

где для бинарного изображения B и структурирующего элемента E, $\circ$ – обозначает эрозию, за которой следует дилатация, т.е. операция открытия.

Для классификации изображений были реализованы три метода: метод ближайшего соседа, предварительно обученные свёрточные нейронные сети и созданная в данной работе свёрточная нейронная сеть.

Классификация методом ближайшего соседа происходит с помощью гистограмм цвета и кривизны, извлечённых с помощью реализованных методов обработки изображений. Оценка функции плотности метода ближайшего соседа для вероятности происходит путем выборки, состоящей из N объектов при нахождении расстояния d от точки X до k-ближайшего соседа. Для определения расстояния можно воспользоваться любой подходящей метрикой [4]. В качестве оценки плотности вероятности можно применить метод расстояния пересечения гистограмм

$$D = \sum_{i=1}^{n} \min\left(\mathrm{H}_j^1, \mathrm{H}_i^2\right), \tag{7}$$

где $\mathrm{H}_j^1, \mathrm{H}_i^2$– гистограммы. Выбранный метод расчета расстояния превосходит другие методы расчета расстояния, такие как расстояния Бхаттачария, L_1, L_2, и x^2. Гистограммы были нормализованы до единичной длины

$$D_{\text{н}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \min\left(\mathrm{H}_j^1, \mathrm{H}_i^2\right)}{\sum_{i=1}^{n} P_i}, \tag{8}$$

где P_i – количество пикселей в гистограмме.

Для количественного измерения эффективности классификации, данный метод был протестирован на изображениях с низким разрешением, тенями и фоновым загрязнением. Следовательно, если алгоритм неверно классифицировал более пяти изображений видов растений, то это принималось за одну ошибку. Производительность этого метода привела к тому, что точность сопоставления по каждому запросу составила 96,8%.

Предварительно обученными сетями, выбранными для реализации в данной работе, были: AlexNet [5], DenseNet [5], ResNet [5] и VGGNet [5]. Чтобы избежать переобучения, последний слой каждой модели был заменен новым слоем, который стал узлом тонкой настройки (*fine-tuning*). После процесса обучения, используя метод передачи обучения (*Transfer Learning*), для каждой реализованной предварительно обученной модели: AlexNet, DenseNet, ResNet и VGGNet, были получены результаты точности обучения 83,3%, 79,6%, 81,2% и 86,7%, соответственно. Результирующие

оценки тестирования предварительных обученных сетей составили: 80,4%, 77,2%, 76,1% и 84,6% соответственно.

Созданная в результате настоящей работы свёрточная нейронная сеть была специально структурированна для решения проблемы автоматической идентификации и классификации видов растений и их болезней. На рис. 3 можно увидеть, что данная сеть состоит из семи слоёв из которых пять имеют три основные операции: свёртка (*Conv2D*), активация (*ReLU*) и нормализация пакетов (*Batch Normalization*). Последние два слоя являются полносвязными слоями. Сеть состоит примерно из 58 миллионов параметров, из которых только 2 000 являются необучаемыми.

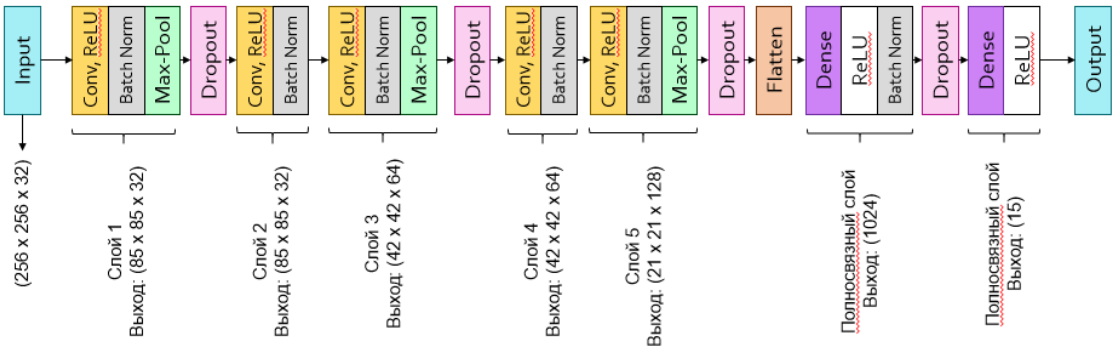


Рис. 3. Схема архитектуры разработанной свёрточной нейронной сети

Данная модель была обучена методом передачи обучения (*Transfer Learning*). На рис. 4 видно, что максимальная результирующая оценка точности разработанной модели после процесса обучения составила 99,1%, а максимальная оценка точности после процесса тестирования – 97,8%.

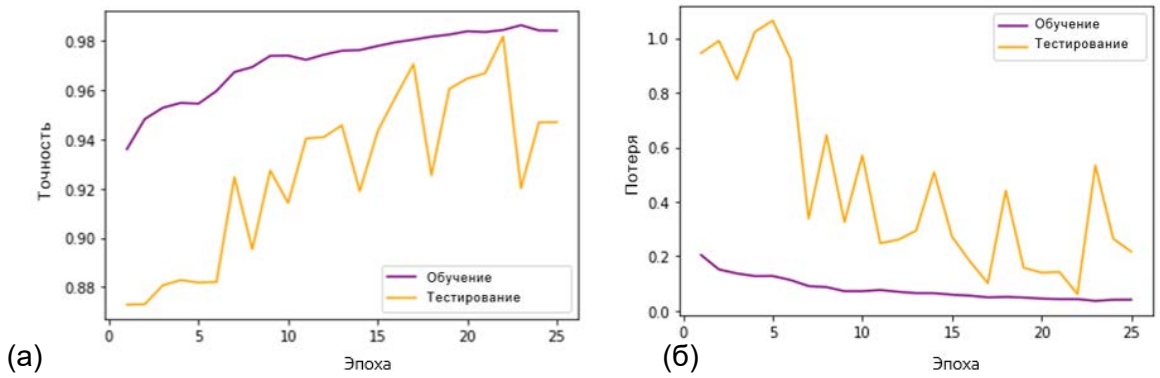


Рис. 4. График точности на эпоху (а) и график потери на эпоху (б)

Результаты проведенных исследований показали, что есть возможность реализовать и внедрить более одного метода для автоматизированного анализа изображений растений для оценки эффективности управления синтетической растительной средой. Наилучшие общие показатели точности в классификации изображений здоровых листьев и отделение от листьев с визуальными симптомами фитопатологий были получены сетью, созданной в данной работе. Одновременно, данная работа имеет значительный потенциал для будущего применения и развития.

Литература

1. Kumar N., Belhumeur P.N., Biswas A., Jacobs D., Kress W.J., Lopez I., Soares J.B.V. LeafSnap: A Computer Vision System for Automatic Plant Species Identification. 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://leafsnap.com (дата обращения: 15.06.2020).
2. Barre P., Stover B.C., Muller R.F., Steinhage V. LeafNet: A computer vision system for automatic plant species identification. 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.leafnet.pbarre.de/ (дата обращения: 15.06.2020).
3. PlantVillage Dataset. 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://data.mendeley.com/datasets/tywbtsjrjv/1 (дата обращения: 18.06.2020).
4. Поцыкайло А.А.: Использование метода к-ближайших соседей при распознавании полутоновых изображений. Таганрог: Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. С. 258-260.
5. Сикорский О.С.: Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений. М.: МГТУ им. Баумана. 2017. С. 1-8.

Шлямова Елена Евгеньевна
Год рождения: 1999
Университет ИТМО,
Факультет прикладной оптики
студент группы № B3432,
направление подготовки: 16.03.01 – Техническая физика,
e-mail: shlyamova@gmail.com
Ежова Ксения Викторовна
Год рождения: 1981
Университет ИТМО,
факультета прикладной оптики,
к.т.н., доцент,
e-mail: ezhovakv@itmo.ru

УДК 535.8

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ВЗГЛЯДА НА ОСНОВЕ МИКРОКОМПЬЮТЕРА RASPBERRY PI

Е.Е. Шлямова
Научный руководитель – к.т.н., доцент К.В. Ежова

Аннотация
В работе рассмотрен процесс разработки алгоритмов для определения направления взгляда пользователя. Разработанная система является монокулярным айтрекером и предназначена для использования в гарнитуре дополненной реальности на основе популярного в студенческой среде микрокомпьютера Raspberry Pi. Практическая значимость работы заключается в возможности применения проекта для малобюджетных студенческих исследований, использования описываемого программно-аппаратного комплекса в качестве компонента более крупных проектов в сфере промышленной автоматизации и в социальных проектах людьми с ограниченными возможностями здровья.

Ключевые слова
Айтрекинг, отслеживание взгляда, обработка изображений, метод темного зрачка, перспективное преобразование, калибровка, OpenCV, Raspberry Pi.

Введение

Технология отслеживания направления взгляда (айтрекинг, англ. eye tracking) используется в когнитивных, психологических и психолингвистических науках, маркетинговых, медицинских исследованиях [1]. Одно из наиболее впечатляющих и важных приложений айтрекинга в медицине – ранняя диагностика аутизма у детей по зрительному поведению при разглядывании человеческих лиц, в частности, глаз. Помимо научной сферы айтрекинг широко применяется в игровой индустрии (для создания динамической экспозиции, направленного звука и разрешении игровых механик), в сфере обучения, для адаптации людей с ограниченными возможностями, а также в качестве компонента взаимодействия с системами умного производства.

Оборудование для отслеживания взгляда пользователя, представленное на сегодняшний день на рынке, как правило, отличается достаточно высокой стоимостью. Так стоимость носимых гарнитур с возможностью отслеживания взгляда начинается от нескольких десятков тысяч рублей, что делает учебные исследования и прикладные проекты с использованием айтрекинга затруднительным для большинства студентов и

повышает порог вхождения в научную и проектную деятельность. Данный проект призван не только создать доступную по цене готовую к использованию систему, но и предоставить платформу с возможностью расширения функционала под конкретные нужды проекта и открытым исходным кодом на часто используемом в научно-технической сфере языке программирования Python, с использованием популярного среди энтузиастов микрокомпьютера Raspberry Pi [3, 4].

Методология

В силу специфики материальной базы и ориентира на доступность, разрабатываемая система не ставит перед собой задачу осуществления полномасштабного окулографического исследования, ограничиваясь регистрацией длительных зрительных фиксаций (длительностью от одной секунды), которые указывают на объект интереса пользователя. Каждый кадр рассматривается как снимок глаза в состоянии зрительной фиксации. Для исключения погрешности, возникающей при регистрации снимка в процессе совершения саккады используются математические методы. Таким образом, допуская, что в процессе использования системы большую часть времени пользователь будет взаимодействовать с неподвижными предметами, объектом исследования становятся зрительные фиксации.

Разрабатываемая система-айтрекер закрепляется на очках пользователя, и по данных о координате центра зрачка определяет направление взгляда. Для определения центра зрачка в окулографии используется два основных метода: метод темного и метод светлого зрачка.

В методе светлого зрачка используется вспомогательный источник освещения (как правило, инфракрасный), расположенный так, чтобы в результате отражения света от сетчатки на регистрируемом изображении зрачок представлял собой светлую область на изображении (чтобы возникал так называемый эффект красных глаз). Метод светлого зрачка обеспечивает высокую контрастность изображения на границе радужка – сетчатка, благодаря чему часто используется в высокоточной окулографии. Однако метод требует размещения источников света вблизи оси камеры и его эффективность значительно зависит от даже малых поворотов головы, что затрудняет его использование в носимых компактных системах.

Метод темного зрачка является обобщением методов с использованием дополнительных источников освещения или без них, при этом на изображении зрачок отображается как темная область. Метод темного зрачка в большинстве случаев обеспечивает меньшую контрастность, но менее требователен к точности установки источника освещения (при его использовании). Для реализации метода темного зрачка достаточно камеры видимого диапазона и наличия общего освещения. Из-за простоты реализации для данного проекта был выбран именно метод темного зрачка.

Прототип

Исходя из результатов анализа аналогов, проведенного в рамках выпускной квалификационной работы был сделан вывод, что для использования в студенческой научной среде проект должен быть доступным финансово и иметь открытый исходный код с минимальным порогом вхождения в программирование. Отчасти эти требования выполняются с использованием платформы Raspberry Pi и базовых алгоритмов на языке программирования Python с использованием открытой библиотеки OpenCV. Стоит отметить, что операционная система Raspbian, часто устанавливаемая на микрокомпьютеры Raspberry Pi, позволяет создавать полный образ системы с целью ее копирования на карту памяти для использования в другом микрокомпьютере Raspberry Pi. Таким образом, копирования проекта достаточно будет скачать образ системы с рабочими алгоритмами, записать его на карту памяти и установить в микрокомпьютер.

Ограничение состоит в том, что в проекте необходимо будет использовать ту же конфигурацию камер, что и в оригинальном проекте.

В прототипе, представленном на рис. 1, использованы следующие компоненты: микрокомпьютер Raspberry Pi 3B, модуль камеры Raspberry Pi, OLED дисплей с диагональю 0,96 дюймов, корпус для системы отображения и простая оптическая система, состоящая из собирающей линзы с с фокусным расстоянием 60мм и световым диаметром 30мм, зеркала и плоскопараллельной пластины. Масса прототипа составила 30 г.

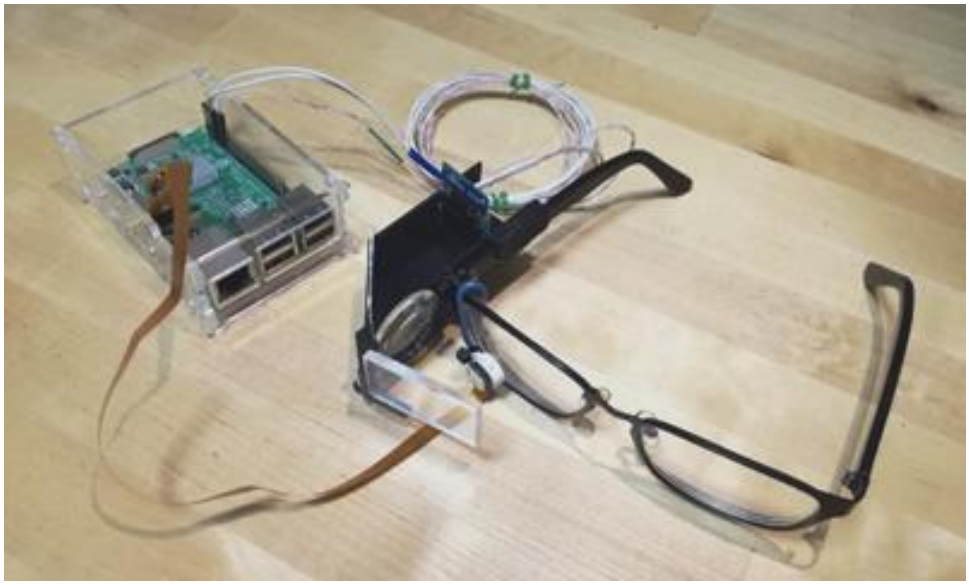


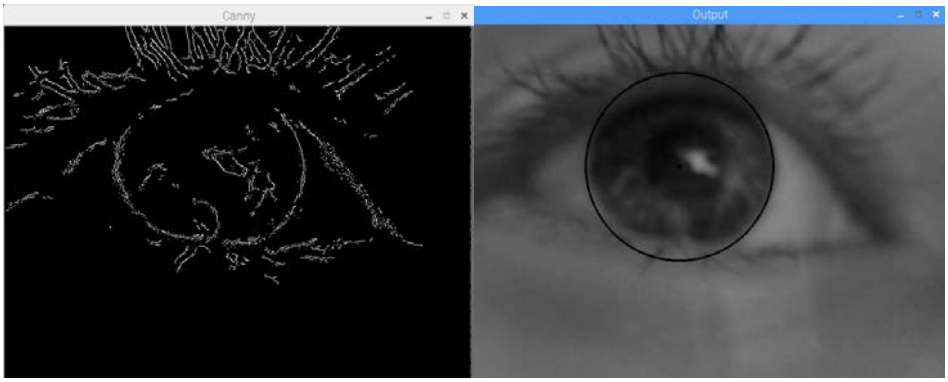
Рис. 1. Прототип системы

В разрабатываемом проекте был использован язык программирования Python, как один из наиболее распространенных в научно-техническом сообществе, удобных и доступных к изучению. Обработка изображения реализована за счет методов популярной в области компьютерного зрения библиотеки OpenCV. Операционная система (ОС), установленная на микрокомпьютер – Raspbian. Выбор данной операционной системы обусловлен ее оптимизацией для работы с архитектурой используемого процессора (поскольку указанная ОС была создана специально для микрокомпьютеров Raspberry), а также наличием необходимого базового функционала для программирования.

Алгоритм обработки изображения

Для получения данных о центре зрачка использовалась обработка изображения с камеры, направленной на глаз пользователя. Алгоритм нахождения центра зрачка включал в себя три основных этапа: перевод исходного изображения в градации серого, применение фильтра низких частот и детектирование окружности методом Хафа.

Стоит отметить, что в работе использовалось детектирование окружности радужки, а не зрачка, поскольку метод Хафа использует предварительную обработку изображения фильтром границ Кенни, что показано на рис. 2. Поскольку значение градиента на границе радужка – склера выше, чем на границе зрачок — радужка, первая из указанных границ определяется фильтром Кенни значительно лучше, это позволяет повысить стабильность работы алгоритма в целом.



(а) (б)

Рис. 2. Этапы определения окружности методом Хафа: а – применение фильтра Кенни, б – детектирование окружности

После получения координаты зрачка на изображении следует определение направления вектора взглада. Для этого в системе реализован алгоритм калибровки с использованием перспективного преобразования. Калибровка осуществляется каждый раз при надевании системы, поскольку точность айтрекера значительно зависит от расположения камеры относительно глаза пользователя и чувсвительна к смещениям.

Система использует две камеры, одна из которых фиксирует положение зрачка, другая направлена во внешнее пространство. В процессе калибровки пользователь следит за специальной меткой, перемещаемой в пространстве. Камера айтрекера описанным выше алгоритмом определяет координаты зрачка, а внешняя камера – координаты метки. Для упрощения задачи автоматического детектирования метки был использован модуль ArUco и одноименные метки. С помощью ArUco система способна определять координату центра метки как конечной точки вектора направления взгляда, ее идентификатор, предоставляющий возможность использования меток не только в процессе калибровки, но и в рабочем режиме для отображения информации об объекте взаимодействия или запуска алгоритма действий, например, в рамках умного производства. В процессе калибровки программа регистрирует несколько пар точек: координат центра зрачка в пространстве изображения с камеры айтрекера и соответствующих им координат центра метки, за которой наблюдает пользователь, во внешнем пространстве (рис. 3).

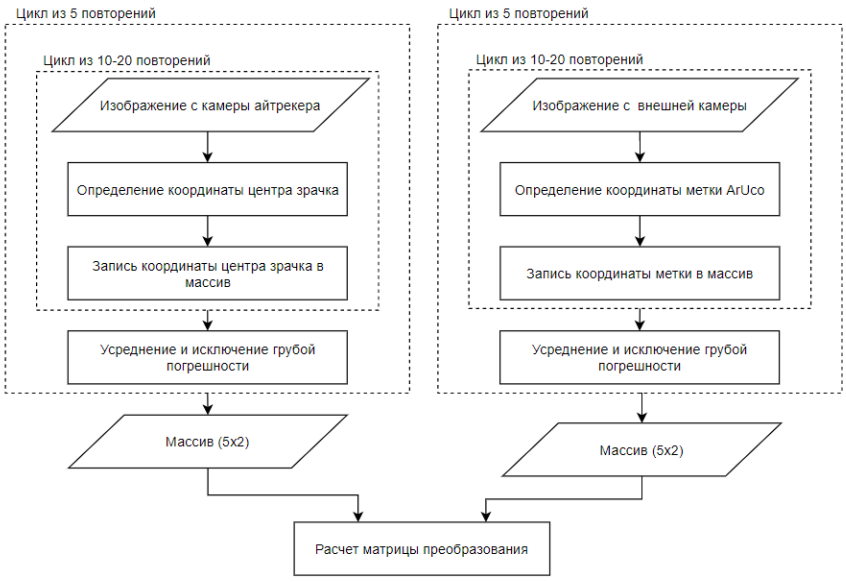


Рис. 3. Блок-схема алгоритма калибровки

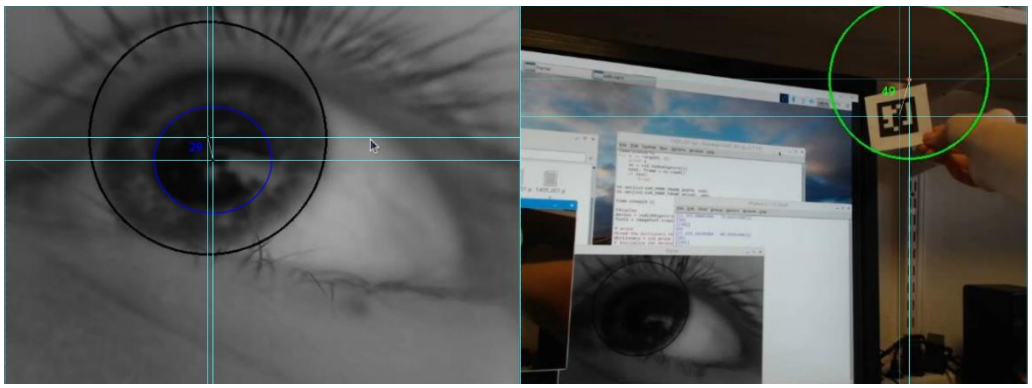
Определение каждой из координат обозначенных точек производится по видеоряду, то есть ряду кадров, который в процессе тестирования системы был равен 10. Для поиска и исключения грубой ошибки в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [2] «Измерения прямые многократные» в алгоритме использован критерий Граббса. После исключения грубой ошибки алгоритм определяет усредненное значение и записывает его в соответсвующий массив. По полученным элементам каждого из массивов (парам точек) алгоритм рассчитывает матрицу преобразования, позволяющую сопоставить два пространства.

Рассчитанная в ходе калибровки матрица преобразования представляет собой универсальный способ перехода от одного простанства к другом, и в дальнейшем, в рабочем режиме системы, позволяет по координате центра зрачка однозначно определять точку интереса пользователя во внешнем пространстве.

Результаты

Тестирование системы осуществлялось в помещении, при условиях дневного и общего освещения. Специализированная подсветка глаза пользователя или местное освещение не использовались. Камера была зафиксирована при помощи клипсы на очках пользователя.

Погрешность нахождения центра зрачка определялась по изображению с камеры в процессе калибровки. Анализ погрешности определения взгляда проводился в режиме работы системы после калибровки. Пользователь следил за меткой, перемещаемой в его поле зрения, результаты записывались в формате видеоряда. Разметка данных производилась вручную, определение линейной величины абсолютной погрешности — при помощи инструментов программного обеспечения Photoshop. Пример размеченных данных представлен на рис. 4.



(а) (б)

Рис. 4. Погрешность определения координат: а – центра зрачка, б – направления взгляда

Синим эллипсом на рисунке отмечен зрачок, найденный вручную, черная окружность – результат автоматического определения радужки алгоритмом. Синим числом отмечено расстояние между центрами эллипса и окружности, значение погрешности в пикселях. Красная точка на рисунке – предполагаемое направление взгляда, рассчитанное алгоритмом автоматически. Зеленой окружностью отмечена предполагаемая область интереса, радиусом 100 пикселей, зеленым числом – расстояние между центром области интереса, определенной алгоритмом и действительной точкой интереса, центром марки, отмеченной вручную. После определения величины погрешности в пикселях был произведен пересчет в угловую меру.

По данным, полученным в результате тестирования, абсолютная погрешность определения направления взгляда в случае успешной калибровки не превышает 9˚06’.

Точность работы алгоритма определения направления взгляда напрямую зависит от точности работы алгоритма определения центра зрачка и корректности калибровки. Для правильной калибровки необходимо отсутствие бликов на радужке и зрачке, нормальные условия освещения и перемещение калибровочной марки в пределах монокулярного поля зрения с отклонением от центрального положения в 15°-20° к виску и 20°-30° к носу. Краевые положения зрачка не естественны для работы пользователя и плохо детектируются системой. Также требуется проводить контроль правильности детектирования радужки в процессе калибровки.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы был проведен анализ аналогов и сформированы основные требования к системе — низкая стоимость, доступность компонентов, открытость платформы и инструментов разработки. Для тестирования алгоритмов определения центра зрачка и направления вектора взгляда была создана 3Д-модель прототипа и проведена его сборка на базе доступных и знакомых студентам компонентов. Алгоритм определения направления вектора взгляда был разработан и протестирован на реальных данных, полученных с прототипа системы. По результатам работы получены оптимальные для использованной платформы и методов результаты. Несмотря на то, что погрешность разработанной системы высока в сравнении с аналогами, она является функциональной, а главное, доступной базой для проведения исследований. Точность разработанного айтрекера органичена производительностью системы и оптимальностью использованных алгоритмов. Увеличение точности может быть достугнуто усложнением алгоритма и введением дополнительных критериев поиска центра зрачка, а следовательно использованием более производительного микрокомпьютера (например, Raspberry Pi 4 или Invidia Jetson nano). Также увеличение точности может быть достигнуто с помощью применения машинного обучения вместо алгоритмизации.

Литература

1. Айтрекинг в психологической науке и практике / Отв. ред. Барабанщиков В.А. М.: Когито-Центр. 2015. 410 с.
2. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введен 01.01.2013. М.: Стандартинформ. 2013. 18 с.
3. Ежова К.В. Моделирование и обработка изображений. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО. 2011. 93с.
4. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV. U.S.: O’Reilly Media, Inc.. 2008. 556 p.

Яицкий Антон Андреевич
Год рождения: 1997,
Университет ИТМО,
факультет безопасности информационных технологий,
студент группы № N3453,
направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность,
e-mail: anton_yaitski@mail.ru
Гирик Алексей Валерьевич
Год рождения: 1982,
Университет ИТМО,
к.т.н., ординарный доцент,
e-mail: avg@itmo.ru

УДК 001

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК ИНФОРМАЦИИ В ЗАЩИЩЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ВАГОНА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОЕЗДА МЕЖДУГОРОДНЕГО СООБЩЕНИЯ “САПСАН”

А.А. Яицкий
Научный руководитель – к.т.н., ординарный доцент А.В. Гирик

Работа выполнена в рамках темы НИР №223437 “Разработка системы технической защиты от утечек информации в защищённых помещениях вагона специального назначения поезда междугороднего сообщения «Сапсан».

Аннотация
В работе рассмотрен уровень нынешней защищенности купе-переговорной поезда “Сапсан”, существующие уязвимости, а также описано разработанное решение по различным аспектам защиты. По изложенному следует вывод, что защита купе-переговорной поезда “Сапсан” недостаточная. Требуется обеспечить защиту этого помещения от утечек по названным каналам утечки и перекрыть уязвимости. В ходе работы будут рассмотрены определенные задачи, направленные на обеспечение защиты.
Ключевые слова
Технические каналы утечки, купе-переговорная, “Сапсан”, техническая защита, защиты переговоров.

Высокоскоростные электропоезда “Сапсан”, принадлежащие ОАО “РЖД” следуют по маршруту между городами Москва и Санкт-Петербург с декабря 2009 года. По словам сотрудников НИИАС (Дочернее Общество ОАО “РЖД”), в компании уже поднималась тема обеспечения информационной безопасности в поезде, в том числе и возможности проведения конфиденциальных переговоров в пути. Сейчас не существует доступных всем видов транспорта с возможностью проведения конфиденциальных переговоров прямо во время маршрута. Но доработка и модернизация купе-переговорной “Сапсана” открывает именно такую перспективу. Оснащение данного помещения системой защиты от утечки информации повысит экономическую эффективность продажи билетов в нем, так как аналогов по безопасности, скорости и удобству поездки на рынке транспорта не будет.

С точки зрения информационной безопасности у купе-переговорной есть

определенное количество уязвимостей. Она отделена от остальной части вагона тамбуром, а с другой стороны от нее находится кабина машиниста. Разделением является стекло, которое может становиться матовым, но оно не является безопасным из-за возможности снятия с него акустической информации. Также не реализован ограниченный доступ в тамбур между рассматриваемым помещением и части вагона для пассажиров Первого класса. Однако после переоборудования купе-переговорной, ее можно будет позиционировать как уникальное решение не только по предоставлению уединенного помещения с сервисом высокого уровня, но и как мобильный пункт для ведения конфиденциальных переговоров.

Модернизация, само собой, не будет заключаться исключительно в реализации системы контроля доступа в помещение, будет рассмотрено две модели защиты - активная и пассивная и выбран наиболее оптимальный вариант.

Для того, чтобы обеспечить безопасность конфиденциальных переговоров в купе-переговорной, нужно определить границы контролируемой зоны. Выделение контролируемой зоны необходимо для корректной организации мер по защите помещения. Некоторые названные в модели угроз уязвимости связаны утечками информации по каналам, выходящим за границы контролируемой зоны, поэтому требуется оценить риски и определить зону 1 и максимально приблизительно зону 2. Для купе-переговорной требуется выделить контролируемую зону 1 ($R_{кз}$, R_1), где будет установлена система контроля доступа и постоянные пропуска будут иметь: Проводник, ответственный за обслуживание купе-переговорной; начальник поезда; машинист. И соответственно разовые пропуска в контролируемую зону (4 шт.) будут выдаваться пассажирам купе-переговорной на время поездки, около 4 часов. Зона 2 будет определена с помощью контрольных точек (которые будут выбраны приблизительно). Такое разделение пространства Первого вагона представлено на рис. 1.

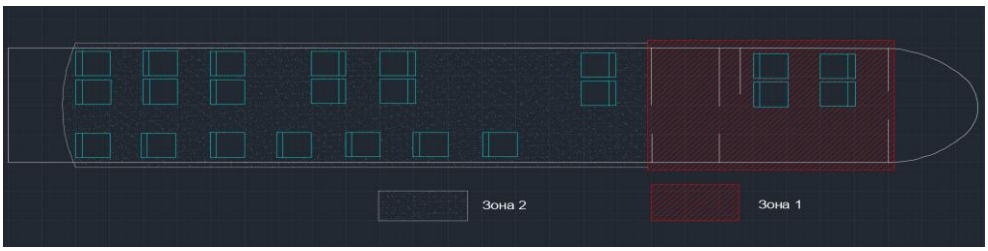


Рис. 1. Контролируемая зона

Одним из важнейших решений, реализующих систему безопасности для купе-переговорной, будет являться развертывание СКУД. Использование системы контроля доступа сведет до минимума вероятность реализации определенной группы угроз, связанных с подслушиваем при нахождении в тамбуре. Для ситуации с ограничением доступа в контролируемую зону купе-переговорной и тамбура требуется обычная СКД. Применение автономной системы является самым рациональным вариантом. Преграждающее устройство должно быть расположено на двери, разделяющей тамбур и остальную часть вагона. Нет необходимости вести журнал событий, учет времени прохождения границ контролируемой зоны в обе стороны для лиц, имеющих туда доступ. Также не требуется покупка и обслуживание сервера, что подтверждает выбор именно автономного варианта системы [1]. Итак, для автономной СКД на одну точку прохода требуется следующее оборудование: считыватель карт, периферийное оборудование для обеспечения блокировки двери, идентификаторы (карты) и кнопка открытия со стороны контролируемой зоны. На рис. 2 представлено расположение устройств, элементов СКД.

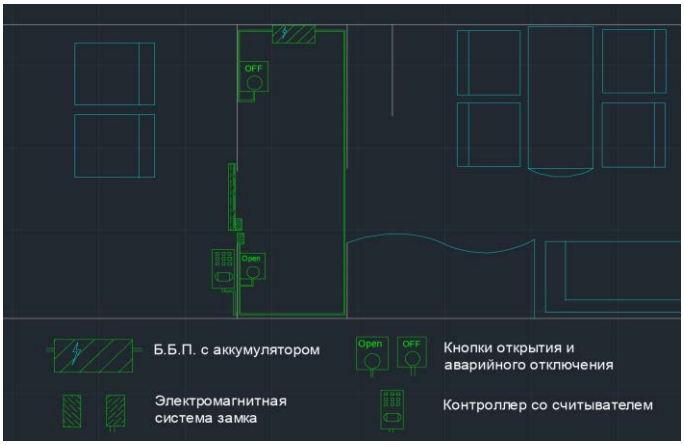


Рис. 2. Компоненты СКД

У нынешнего варианта построения сети существуют определенные уязвимости, об этом говорит, например, случай взлома сети хакером в ноябре 2019 года [2]. Для повышения уровня безопасности сети был выбран вариант полной замены всех устройств на Cisco Развертывание сети Cisco является дорогостоящим решением. Такие сети использует большинство передовых компаний с высокими финансовыми возможностями. В случае с поездом “Сапсан”, ОАО “РЖД” получит возможность в будущем значительно расширить функционал и повысить уровень безопасности и качества предоставления услуг пассажирам. У Cisco есть решения для транспортной сферы, а именно, конкретно для железных дорог. Начав с организации бортового Wi-Fi, позже будет доступно соединить воедино контроль за продажей билетов, трансляцию видео на дисплеях в онлайн-режиме, киоски на станциях, информационные табло. Также, немаловажным будет интеграция в эту систему и определенных механизмов безопасности. Таких как IP-камеры видеонаблюдения, датчики жизнедеятельности машинистов электропоездов, турникеты для доступа на платформу в зоне досмотра и других [3].

Что касается сети в поезде, то требуется организовать доступ в сеть Интернет для пассажиров, а также применить какой-либо дополнительный механизм безопасности для купе-переговорной. Очевидно, что для высокой скорости соединения личных устройств с точками доступа, нужно установить по одному аппарату в каждом вагоне и отдельный для купе. Будет возможен полный мониторинг сети с помощью ПО Cisco DNA и настройка точек доступа с помощью Cisco Mobility Express [4]. На рис. 3 изображена топология сети поезда с моделями выбранных устройств.

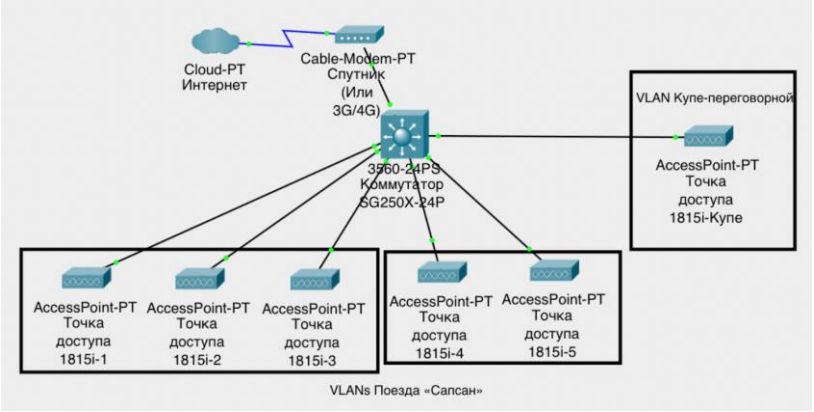


Рис. 3. Топология сети для 6 устройств точек доступа

Обеспечение системы технической защиты может быть основано на активных или пассивных средствах защиты. Каждая из моделей имеет свои преимущества и недостатки. Некоторые из пассивных средств гораздо привлекательнее активных с точки зрения стоимости, но не будут выбраны для окончательного варианта системы защиты ввиду того, что требуют слишком серьезных вмешательств в конструкцию помещения. Некоторые активные средства дороже, чем выполняющие свои функции пассивные аналоги, поэтому нет смысла выбирать более дорогостоящее решение, достаточно определить необходимый уровень безопасности и обеспечить его.

Основное внимание при проектировании системы защиты должно быть акцентировано именно на безопасности, в основе которой будет защита от утечек, реализующихся без помощи специальных технических средств разведки. То есть это обязательно использование системы контроля доступа в контролируемую зону, обеспечение безопасности беспроводной сети, защита от утечки речевых данных путем прямого прослушивания, а также защита видовой (отображаемой) информации. Второстепенной задачей, хоть и тоже важной, будет перекрытие утечки по виброакустическим каналам, каналам ПЭМИН, а также несанкционированный доступ к информации, обрабатываемой на технических средствах [5].

Комбинированный вариант включает в себя реализацию СКД, чтобы исключить доступ в тамбур, а значит будет получена возможность не использовать ни активное шумоподавление, ни специальные материалы на перегородку к тамбуру. С противоположной стороны выбор сделан в пользу активных виброизлучателей, так как они недороги, просты в установке и не будет нужды в изменении интерьера. Помехоподавляющие фильтры (и ethernet-размыкатель для точки доступа) могут быть выбраны в зависимости от доступности цен. На рис. 4 изображена схема расположения устройств комбинированной защиты.

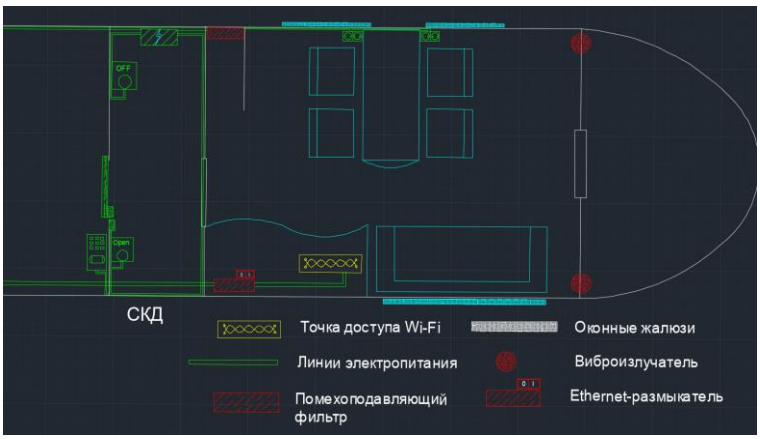


Рис. 4. Общая схема расположения устройств защиты

Главный принцип построения системы защиты в том, чтобы потенциальные убытки от утечки защищаемой информации не превышали стоимости ее обеспечения. В случае с купе-переговорной нельзя точно определить эти параметры, так как ежедневно в ней пассажирами могут являться представители совершенно разных отраслей, имеющих свои коммерческие тайны. Купе могут использовать как для переговоров между организациями, так и для обсуждения развития своей компании и многие другие ситуации. В нынешнее время все стремится к мобильности, все сферы жизни стремятся к ускорению предоставления услуг, все сервисы становятся более доступными, люди пытаются максимально рационально пользоваться своим временем, это касается и их работы. Главная задача обеспечения безопасности этого помещения -

предоставить пассажирам возможность, находясь в пути между городами, чувствовать себя в полной безопасности в купе поезда и иметь возможность вести дела в пути без риска промышленного шпионажа.

Это также может иметь и имиджевый подтекст. Обеспечение безопасности в купе-переговорной высокоскоростного поезда не имеет аналогов на рынке, а если сравнивать с автомобилем, выигрывает по комфортабельности и безопасности с точки зрения опасности аварий и других чрезвычайных происшествий. Кроме того, в автомобиле также существует много потенциальных каналов утечки информации и его движение зависит от ситуации на дорогах. Поэтому оборудование системой защиты от утечки информации купе-переговорной поезда “Сапсан” создаст новую ячейку в сфере предоставления услуг для бизнеса в транспортной сфере.

В ходе работы была проанализирована текущая защищенность помещения, разработано решение по повышению безопасности сети, решение по развертыванию СКД, а также технической защите помещения от утечек по техническим каналам.

Одной из перспектив развития построения системы защиты купе-переговорной является последующая разработки методологии переоборудования любого другого небольшого помещения поезда для проведения конфиденциальных переговоров. Например, не только для поезда “Сапсан”, а для других поездов ОАО “РЖД”, в которых пассажиры могут, покупая билеты заранее, выбрать купе, в котором будет выполнена система защиты от утечек информации, что создаст дополнительный класс обслуживания в транспорте к услугам бизнеса и государственных служащих. Само собой, выбранная система защиты для купе-переговорной должна быть переработана с учетом специфики другого помещения, а также быстроты развертывания и мобильности.

Литература

1. ГОСТ Р 51241-2008 Средства и системы контроля и управления доступом. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. [Электронный ресурс]. Введ. 2009-09-01. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200071688. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 07.03.2020.
2. Самый беззащитный – это Сапсан. [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/post/476034/. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 02.04.2020.
3. Пайпер Б. Администрирование сетей Cisco / пер. с англ. Райтмана М.А. М.: ДМК Пресс. 2018. 316 с.
4. The Cisco Digital Network Architecture Vision – An Overview. [Электронный ресурс] – URL: https://www.cisco.com/c/dam/global/ru_kz/solutions/enterprise-networks/digital-network-architecture/pdf/white-paper-c11-736842.pdf. Режим доступа: свободный. (Яз. Англ.) Дата обращения: 10.04.2020.
5. Ворона В.А., Костенко В.О. Способы и средства получения акустической речевой информации [Электронный ресурс] / В.А. Ворона, В.О. Костенко / Вестник ВНИИМАШ. 2013. №1(14). URL: http://www.vniinmash.ru/i/file/ vestnik_1_(14)_2013.pdf#9/. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 12.04.2020.

Яковлева Виктория Евгеньевна
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
студент группы №B3416,
направление подготовки: 09.03.03 – Прикладная информатика,
e-mail: viktoriya.yve@gmail.com
Скаков Павел Сергеевич
Год рождения: 1984
Университет ИТМО,
факультет прикладной оптики,
к.т.н. ассистент,
e-mail: pavelsx@gmail.com

УДК 004.627

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МЕТОДА ПОВТОРНОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ

В.Е. Яковлева
Научный руководитель – к.т.н., ассистент П.С. Скаков

Аннотация
В работе рассмотрено применение обратимого преобразования изображений, сжатых по стандарту JPEG, за счет повторного сжатия с целью уменьшения объема данных. Практическая значимость реализованного ПО обусловлена существующей необходимостью сокращения объема занимаемой памяти и сокращения времени работы алгоритмов сжатия в целях повышения эффективности передачи и хранения изображений без потери информации. Показано, что по сравнению с существующими решениями предложенные реализации работают существенно быстрее, не уступая по степени сжатия.

Ключевые слова
Сжатие данных, повторное сжатие изображений, сжатие без потерь, ассиметричные системы счисления, многопоточное программирование.

В настоящее время колоссальное количество информации передаётся и принимается повсеместно. Основной объём составляют графические данные. Исследование и разработка алгоритмов сжатия изображений до сих пор активно развиваются, поскольку требования к передаче цифровых сигналов, как и количество информации в сети постоянно растут.

В данной работе рассматривается вопрос осуществления обратимого преобразования уже сжатых данных за счет повторного сжатия с целью уменьшения объема данных. Повторное сжатие подразумевает восстановление высокоизбыточных данных исходного изображения (частичное разжатие) и их сжатие более эффективными методами. Помимо самих данных следует также сохранять информацию, которая позволит произвести обратное преобразование и восстановить исходное изображение без потерь. Подобная реализация позволяет без потери информации эффективнее передавать и хранить изображения, что может применяться в крупных хранилищах изображений.

В качестве формата изображений, использующих в том числе сжатие без потерь, был выбран JPEG в силу его широкого распространения. На этапе энтропийного

кодирования в нем чаще всего используется алгоритм Хаффмана. Как известно, он хоть и позволяет быстро сжимать изображения, но степень сжатия данных оказывается ниже, чем при использовании арифметического кодирования. Последнее же не обрело популярности в связи с патентами.

Учитывая высокую распространённость формата и недостатки применяемых на данный момент алгоритмов, основной задачей можно определить предложение аналогичного Хаффману и арифметическому кодированию алгоритма сжатия без потерь, позволяющего получить выигрыш по времени работы алгоритма и/или степени сжатия.

Предлагаемый алгоритм повторного сжатия (рис. 1) производит частичное разжатие изображения, представленного в формате baseline JPEG, до квантованных коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП). Для успешного восстановления исходного изображения также из исходного изображения извлекаются мета-данные изображения и его компонент, таблицы квантования и таблицы Хаффмана.

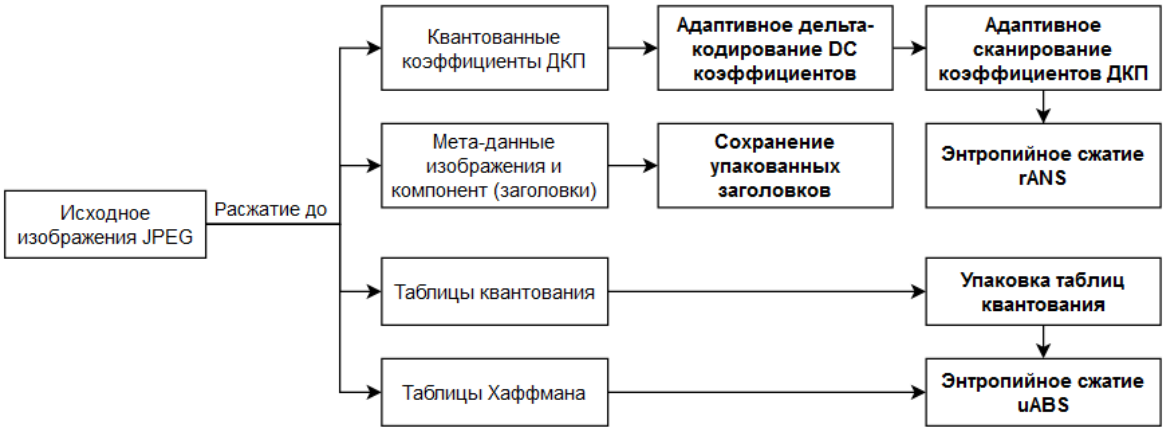


Рис. 1. Схема предлагаемого алгоритма повторного сжатия изображений формата baseline JPEG

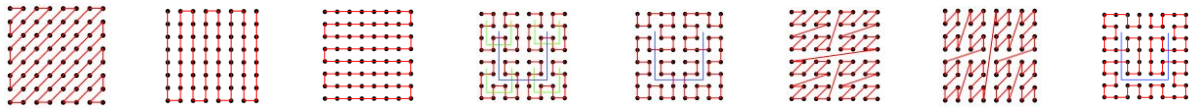
Упаковка таблиц квантования. Подавляющее большинство JPEG файлов используют либо таблицы libjpeg, либо таблицы Photoshop. Идея заключается в кодировании данных таблиц квантования их порядковым номером для кодека (одним байтом). Таким образом удается закодировать подавляющее большинство таблиц квантования. Поскольку в файле может храниться до 4-х таблиц квантования включительно, то данный способ хранения заметно уменьшит объем занимаемой памяти. В случае, если таблица квантования неизвестна кодеку, то она кодируется как есть.

Дополнительный, пусть и незначительный прирост для больших изображений, даст также сохранение заголовков в упакованном виде. В таком случае размер заголовка определяется как сумма размеров типов данных, используемых для хранения данных.

Под адаптивным дельта-кодированием подразумевается использование DC предикторов Lossless JPEG [1] с целью улучшения дальнейшего сжатия посредством кодирования наименьшей разницы из возможных данными предикторами. Для каждого значения DC получается свой индекс, являющийся порядковым номером предиктора, выбранного для дельта-кодирования этого коэффициента. Все индексы будут хранится в массиве, который описан далее. Данный этап выполняется в многопоточном режиме за счет разбиения всех DC коэффициентов на несколько групп, количество которых

равно максимально возможному числу потоков, что позволяет получить значительный прирост по времени работы алгоритма.

После адаптивного кодирования DC проводится адаптивное сканирование всех 64 коэффициентов блока ДКП 8x8. Вместо DC коэффициента на этом этапе уже закодированы их дельта-разности. Аналогично прошлому этапу здесь происходит предсказание наилучшего обхода из 8, представленных на рис. 2. Поскольку первый DC коэффициент кодируется без изменений, то предлагается отдельно для каждого слоя хранить значения этого коэффициента, а в самом массиве данных хранить его как 0. Обработка блоков также происходит в многопоточном режиме, аналогично этапу адаптивного дельта-кодирования.



а б в г д е ж з

Рис. 2. Используемые обходы при сканировании коэффициентов: zig-zag (а); vertical (б); horizontal (в); hilbert (4) (г); hilbert (8) (д); morton (h) (е); morton (v) (ж); moore (з);

Как и в прошлом случае здесь появляются индексы методов, точнее обходов, которые будут кодироваться вместе с предыдущими следующим образом: для всех индексов заводится один массив размер которого в байтах:

$$\sum_{i=0}^{num_components-1} width_in_blocks_i \cdot height_in_blocks_i,$$

где:

$num_components$ – количество компонент изображения;

$width_in_blocks_i$ – количество блоков 8x8 по ширине компоненты i;

$height_in_blocks_i$ – количество блоков 8x8 по высоте компоненты i.

В силу того, что и предикторов, и обходов сканирования не больше 16, то их индексы предлагается хранить в упакованном виде, представленном в таб. 1. Как отмечалось ранее, для индекса обхода сканирования может быть 16 значений, т. к. на каждый обход возможны 2 варианта: обход с ZRLE (RLE с сжатием нулей) и без него. В случае обхода без ZRLE бит 3 будет установлен в 1. В индексе предиктора предлагает кодировать как порядковый номер использованного предиктора, так и знак полученной разности. Если старший бит дельта-разности равен 1, то бит 7 будет возведен в 1, а в массив вместо разности пойдет ее абсолютная величина. В последствии массив индексов также предлагается сжимать ANS.

Таблица 1

Представление одного значения массива индексов

Обозначение	Индекс предиктора				Индекс сканирования			
№ бита	7	6	5	4	3	2	1	0

На этапе энтропийного сжатия предобработанных данных используются асимметричные системы счисления (ANS). ANS [2] представляет семейство методов энтропийного кодирования. В основу легла модификация алгоритма Хаффмана, позволяющую кодировать символы дробным числом бит [3]. Асимметричные системы счисления являются обобщением позиционных систем счисления, в которых символы могут кодироваться разным количеством символов в зависимости от предшествующего контекста. Основное преимущество подхода ANS состоит в том, что он реализует

наиболее простую и эффективную перенормировку состояний. По сравнению с арифметическим сжатием [4], при использовании ANS появляется возможность быстро уменьшить количество бит состояния или хранить их в таблице и за один шаг будет передаваться целый блок бит, что значительно быстрее посимвольного подхода.

Существует несколько различных вариантов для приложения подхода ANS, из которых в работе использовались rANS и uABS для сжатия предобработанных данных и таблиц изображения.

Равномерные асимметричные двоичные системы (Uniform Asymmetric Binary Systems, uABS) [5] используют прямую арифметическую формулу для равномерно распределенных символов. Пусть имеется бинарный алфавит с распределением вероятностей $\Pr(1) = p, \Pr(0) = 1 - p$. До позиции x приблизительно ожидается $p \cdot x$ нечетных позиций (для $s = 1$). Выберем это число появлений как $\lceil p \cdot x \rceil$, получив $s = \lceil p \cdot (x+1) \rceil - \lceil p \cdot x \rceil$. Данный метод можно описать процедурами кодирования (1) и декодирования (2), где за $\lceil x \rceil$ принимается округление вверх до ближайшего целого, а $\lfloor x \rfloor$ – округление вниз.

$$x' = \begin{cases} \left\lceil \frac{x+1}{1-p} \right\rceil - 1, & s = 0 \\ \left\lfloor \frac{x}{p} \right\rfloor, & s = 1 \end{cases}, \tag{1}$$

$$s = \lceil (x+1)p \rceil - \lceil xp \rceil, x' = \begin{cases} x - \lceil xp \rceil, & s = 0 \\ \lceil xp \rceil, & s = 1 \end{cases}. \tag{2}$$

Диапазонные асимметричные системы счисления (Range Asymmetric Numeral Systems, rANS) могут быть рассмотрены как прямая альтернатива арифметическому кодированию, но с небольшим преимуществом: вместо двух умножений за шаг требуется только одно [5]. Интуитивно он разделяет набор натуральных чисел на диапазоны размера 2^n, а затем разделяет каждый из них одинаковым образом на поддиапазоны пропорций, определяемых предполагаемым распределением вероятностей.

Принцип работы алгоритма. Квантование распределения вероятности проводится по делителю 2^n, где $n \in [8,12]$ выбран так, что $p_s \approx f[s]/2^n$ для некоторого натурального числа $f[s]$, обозначающего размеры поддиапазонов. Обозначим $mask = 2^n - 1$, тогда накопительная функция распределения будет выражаться как $CDF[s] = \sum_{i<s} f[i]$. Для $y \in [0, mask]$ введем табличную функцию $symbol(y) = s: CDF[s] \leq y < CDF[s+1]$. В формулах кодирования (3) и декодирования (4) за $a \ll b$ принимается побитовый сдвиг a влево на b бит, $\gg$ побитовый сдвиг вправо.

$$C(x,s) = \left(\left\lfloor \frac{x}{f[s]} \right\rfloor \ll n \right) + (x \bmod f[s]) + CDF[s], \tag{3}$$

$$s = symbol(x \,\&\, mask), D(x) = f[s] \cdot (s \gg n) + (x \,\&\, mask) - CDF[s]. \tag{4}$$

Таким образом можно закодировать последовательность символов в большое натуральное число x. Во избежание использования арифметики больших чисел, на практике используются варианты, которые обеспечивают $x \in [L, b \cdot L - 1]$ путем перенормировки, то есть отправки младших значащих битов x в или из потока битов (обычно L и b имеют степени 2). В варианте rANS x 32-битный. Для 16-разрядной перенормировки $x \in [2^{16}, 2^{32} - 1]$. При необходимости (если $x < (1 \ll 16)$) декодер пополняет младшие биты из битового потока в виде $x = (x \ll 16) + readbits()$.

Проведенные исследования времени работы и степени сжатия при помощи статической и адаптивной реализаций rANS на предобработанных данных показали, что адаптивная реализация позволяет добиться лучшей степени сжатия на наших предобработанных данных, не сильно уступая в скорости работы реализации статического метода первого порядка. Статическая реализация нулевого порядка дает результат по степени сжатия многим хуже, чем все остальные варианты. Поэтому в предложенном алгоритме используется адаптивная реализация rANS.

Кодирование массива индексов при помощи uABS же дает прирост только на малых изображениях, однако на данное кодирование тратится больше времени, чем на адаптивный rANS.

Для оценки эффективности алгоритмов сжатия проводилось по таким параметрам, как коэффициент сжатия $CR = \frac{\text{объем сжатых данных}}{\text{объем исходных данных}}$, время компрессии и время декомпрессии.

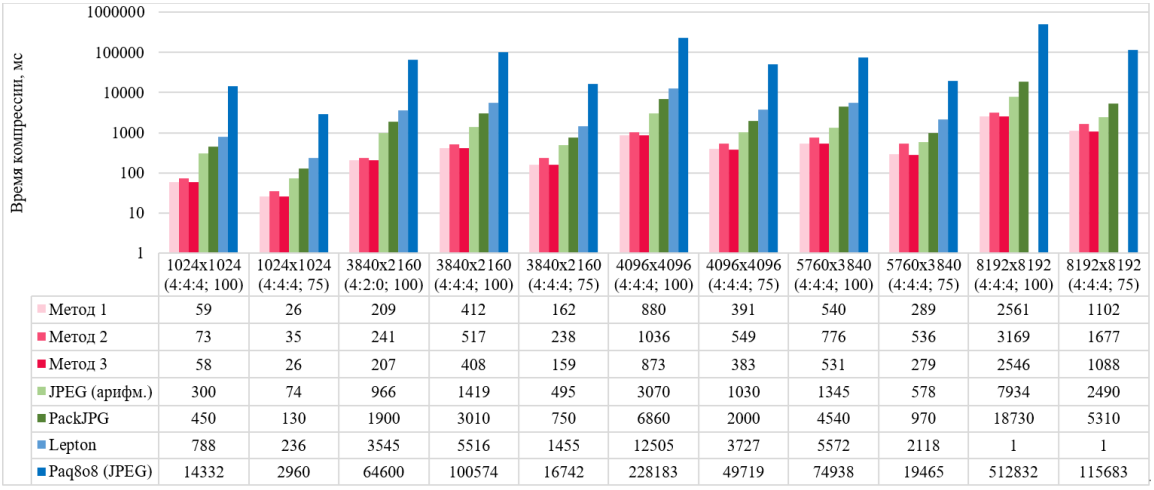
Сравнение предложенных модификаций алгоритма (таб. 2) проводилось со следующими существующими решениями: packJPG, ImageMagick или jpegtran, paq8o8 и lepton. В packJPG используется предсказание коэффициентов ДКП при помощи Paeth предиктора по аналогии с PNG и арифметическое кодирование на основе статистических моделей разных порядков для кодирования разных данных. Lepton использует предсказание коэффициентов по значениям из граничных пикселов в соседнем блоке. Paq8o8 использует нейронную сеть для объединения большого количества контекстных моделей (смешивание контекстов). Результаты сравнения представлены на рис. 3-5. Изображения, сжатые с арифметическим кодированием по стандарту JPEG, получались путем перекодирования при помощи jpegtran (ImageMagick). Тестовые изображения заданы в формате: размер изображения (формат семплирования; качество).

Таблица 2

Описание режимов работы реализованного ПО

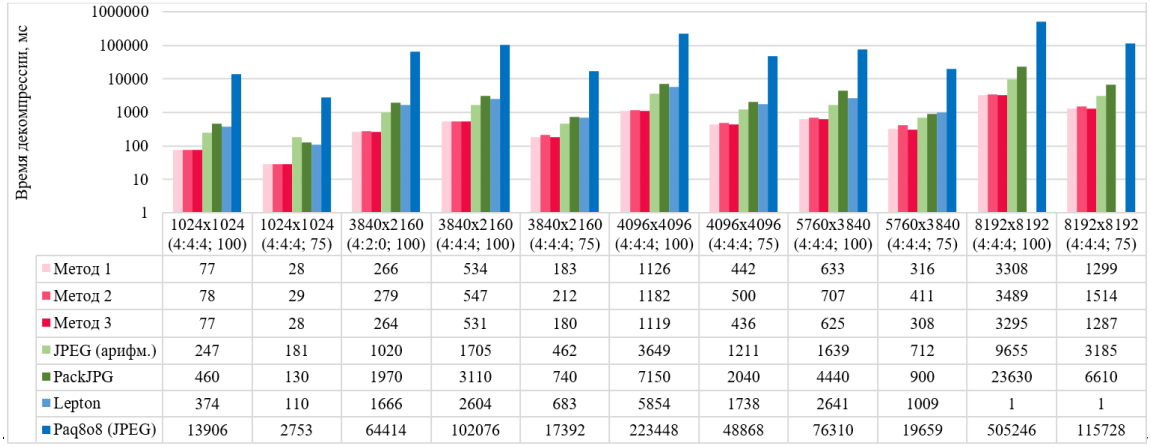
	Метод 1	Метод 2	Метод 3
Сжатие данных	Адаптивный rANS	Адаптивный rANS	Адаптивный rANS
Сжатие массива индексов	Адаптивный rANS	uABS	Не хранится
Сжатие мета-данных и таблиц изображения	Не сжимаются	uABS	Не сжимаются
Используемые предикторы DC (индексы)	Все (0-7)	Все (0-7)	Только классическое дельта-кодирование по стандарту JPEG (0, 1)
Используемые обходы сканирования (индексы)	Все (0-15)	Все (0-15)	Только zig-zag (0)

Глядя на результаты сравнения можно заключить, что предлагаемые реализации позволяют добиться лучших результатов как по времени работы, так и по степени сжатия данных. Наибольший прирост по степени сжатия предложенными методами достигается на изображениях с качеством 100, однако при уменьшении качества JPEG заметен небольшой выигрыш у сторонних реализаций (для Lepton не удалось получить результаты на изображении 8192x8192).



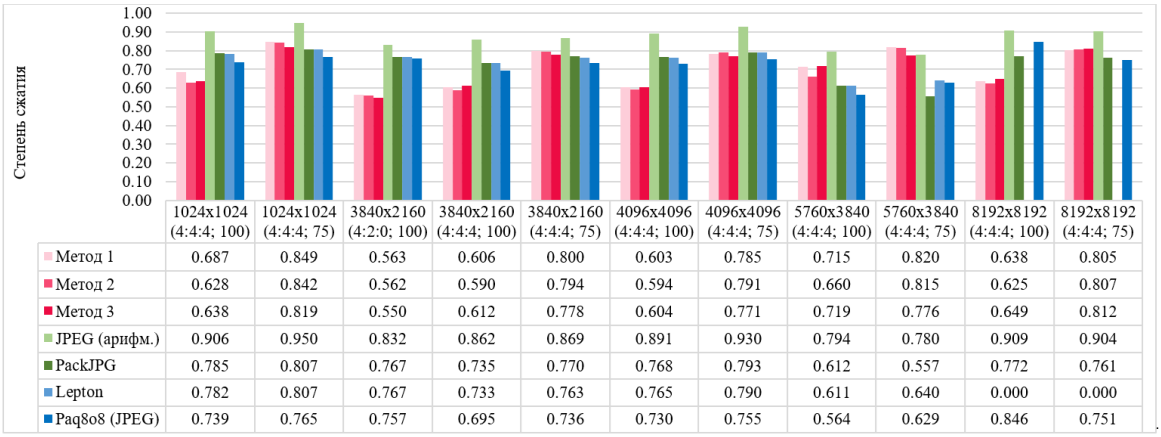
	1024x1024 (4:4:4; 100)	1024x1024 (4:4:4; 75)	3840x2160 (4:2:0; 100)	3840x2160 (4:4:4; 100)	3840x2160 (4:4:4; 75)	4096x4096 (4:4:4; 100)	4096x4096 (4:4:4; 75)	5760x3840 (4:4:4; 100)	5760x3840 (4:4:4; 75)	8192x8192 (4:4:4; 100)	8192x8192 (4:4:4; 75)
Метод 1	59	26	209	412	162	880	391	540	289	2561	1102
Метод 2	73	35	241	517	238	1036	549	776	536	3169	1677
Метод 3	58	26	207	408	159	873	383	531	279	2546	1088
JPEG (арифм.)	300	74	966	1419	495	3070	1030	1345	578	7934	2490
PackJPG	450	130	1900	3010	750	6860	2000	4540	970	18730	5310
Lepton	788	236	3545	5516	1455	12505	3727	5572	2118	1	1
Paq8o8 (JPEG)	14332	2960	64600	100574	16742	228183	49719	74938	19465	512832	115683

Рис. 3. Результаты сравнения по времени компрессии



	1024x1024 (4:4:4; 100)	1024x1024 (4:4:4; 75)	3840x2160 (4:2:0; 100)	3840x2160 (4:4:4; 100)	3840x2160 (4:4:4; 75)	4096x4096 (4:4:4; 100)	4096x4096 (4:4:4; 75)	5760x3840 (4:4:4; 100)	5760x3840 (4:4:4; 75)	8192x8192 (4:4:4; 100)	8192x8192 (4:4:4; 75)
Метод 1	77	28	266	534	183	1126	442	633	316	3308	1299
Метод 2	78	29	279	547	212	1182	500	707	411	3489	1514
Метод 3	77	28	264	531	180	1119	436	625	308	3295	1287
JPEG (арифм.)	247	181	1020	1705	462	3649	1211	1639	712	9655	3185
PackJPG	460	130	1970	3110	740	7150	2040	4440	900	23630	6610
Lepton	374	110	1666	2604	683	5854	1738	2641	1009	1	1
Paq8o8 (JPEG)	13906	2753	64414	102076	17392	223448	48868	76310	19659	505246	115728

Рис. 4. Результаты сравнения по времени декомпрессии



	1024x1024 (4:4:4; 100)	1024x1024 (4:4:4; 75)	3840x2160 (4:2:0; 100)	3840x2160 (4:4:4; 100)	3840x2160 (4:4:4; 75)	4096x4096 (4:4:4; 100)	4096x4096 (4:4:4; 75)	5760x3840 (4:4:4; 100)	5760x3840 (4:4:4; 75)	8192x8192 (4:4:4; 100)	8192x8192 (4:4:4; 75)
Метод 1	0.687	0.849	0.563	0.606	0.800	0.603	0.785	0.715	0.820	0.638	0.805
Метод 2	0.628	0.842	0.562	0.590	0.794	0.594	0.791	0.660	0.815	0.625	0.807
Метод 3	0.638	0.819	0.550	0.612	0.778	0.604	0.771	0.719	0.776	0.649	0.812
JPEG (арифм.)	0.906	0.950	0.832	0.862	0.869	0.891	0.930	0.794	0.780	0.909	0.904
PackJPG	0.785	0.807	0.767	0.735	0.770	0.768	0.793	0.612	0.557	0.772	0.761
Lepton	0.782	0.807	0.767	0.733	0.763	0.765	0.790	0.611	0.640	0.000	0.000
Paq8o8 (JPEG)	0.739	0.765	0.757	0.695	0.736	0.730	0.755	0.564	0.629	0.846	0.751

Рис. 5. Результаты сравнения по степени сжатия

Выводы

Проведенные эксперименты показали, что применение адаптивной предобработки квантованных коэффициентов ДКП перед финальным энтропийным сжатием в большинстве случаев повышает степень сжатия данных, которая по сравнению со стандартным сжатием JPEG при помощи Хаффмана достигает до 45%.

Использование алгоритма адаптивного диапазонного ANS вместо арифметического кодирования по стандарту JPEG позволяет добиться большей степени сжатия, при этом алгоритм отрабатывает за меньшее время.

Разработана программа, позволяющая проводить повторное сжатие изображений, представленных в формате JPEG, использующая рассмотренные в работе алгоритмы с поддержкой нескольких режимов работы.

В дальнейшем планируется исследовать возможность адаптации предложенного метода для систем с массовым параллелизмом, что может дать еще больший прирост скорости работы алгоритма при обработке больший изображений и рассмотрении ANS в контекстном моделировании для увеличения степени сжатия.

Литература

1. JPEG [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://jpeg.org (дата обращения: 08.02.2020).
2. Duda J. Asymmetric numeral systems: entropy coding combining speed of Huffman coding with compression rate of arithmetic coding [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1311.2540 (дата обращения: 15.02.2020).
3. Duda J., Tahboub K., Gadgil N.J., Delp E.J. The use of asymmetric numeral systems as an accurate replacement for Huffman coding. / Duda J., Tahboub K., Gadgil N.J. // 31st Picture Coding Symposium. 2015. P. 65–69.
4. Duda J., Niemiec. M. Lightweight compression with encryption based on Asymmetric Numeral Systems [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1612.04662 (дата обращения: 17.02.2020).
5. Mahoney M. Data Compression Explained [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mattmahoney.net/dc/dce.html (дата обращения: 22.02.2020).

Ячменьков Михаил Михайлович
Год рождения: 1998
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
студент группы №R3436,
направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника,
e-mail: myachmenkov@gmail.com
Пыркин Антон Александрович
Университет ИТМО,
факультет систем управления и робототехники,
д.т.н., профессор,
e-mail: pyrkin@itmo.ru

УДК 004.021

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СМЕЩЕННОГО ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЗА КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ

М.М. Ячменьков
Научный руководитель – д.т.н., профессор А.А. Пыркин

Работа выполнена в рамках темы НИР «Оценка параметров смещенного полигармонического сигнала за конечное время».

Аннотация
Работа посвящена теме определения параметров полигармонического сигнала с конечным числом гармоник со смещением за конечное время. Оцениваемыми параметрами являются величины смещения, частот, фаз и амплитуд сигнала. Для этих целей проектируются три алгоритма онлайн оценки и производится сравнительный анализ результатов. В алгоритмах используется метод динамического расширения регрессора и смешивания (DREM).
Ключевые слова
Онлайн идентификация, DREM, полигармоника со смещением, оценка за конечное время.

Введение

Одной из основных задач, встречающихся в теории автоматического управление, является задача подавление возмущений, оказывающих негативное влияние на поведение объектов управления. В качестве таких возмущений могут выступать вибрации фюзеляжа летательных аппаратов. В случае вертолета, вибрации возникают в следствии вращения лопастей несущего винта и передаются через двигатель к корпусу. Они приводят к ряду негативных эффектов. Во-первых, к потере комфорта экипажа. Во-вторых, к возможной поломке бортового оборудования. И наконец, к уменьшению срока эксплуатации воздушного судна.

Среди разнообразия существующих подходов решения проблемы можно выделить три главные группы: контроль вибрационного отклика корпуса путем воздействия на него, контроль вибрационного отклика корпуса путем воздействия на главный ротор и контроль ротора по измерению вибрационных ускорений/нагрузок на каждую лопасть ротора индивидуально. Но эти стратегии управления предполагают наличие известных параметров вибраций. Поэтому необходимо в структуру системы управления вибрациями в вертолете включить устройство оценки параметров

вибраций, что позволит адаптивно решить эту проблему. При этом сами вибрации могут быть аппроксимированы суммой гармоник с не нулевым средним. Как следствие, задача сводиться к параметрической оценки такого сигнала. Стоит отметить, что одним из основных критериев качества, определяющих работоспособность алгоритмов оценки, является время оценивания. Существуют несколько подходов онлайн-оценки параметров полигармонического сигнала.

В [1] представлен алгоритм параметрической оценки в непрерывном времени всех параметров неопределенного возмущения, имеющего детерминированную полигармоническую структуру. Для идентификации используется стандартная градиентная оценка. Данный алгоритм обладает свойством адаптивности по отношению к изменению параметров исследуемого сигнала и робастностью, то есть помехоустойчивостью к ограниченным по амплитуде не смещенным шумам. Алгоритм обеспечивает экспоненциальную сходимость всех параметров сигнала к истинным значениям. Но существенным недостатком является плохие монотонные качества оценки и сравнительно низкое значение времени оценивания и сложность настройки параметров алгоритма.

В [2] рассматривается алгоритм оценки не симметричной экспоненциально затухающей синусоиды. Данная задача является частным случаем рассматриваемого в данной работе вопроса в случае одной гармоники в спектре исследуемого сигнала. Алгоритм основан на применении DREM, где для динамического расширения регрессора используются операторы задержки. Предложенный метод обладает свойством робастности по отношению к ограниченным по амплитуде высокочастотным шумам и обеспечивает экспоненциальную сходимость ошибки оценивания к нулю. Главным достоинством алгоритма является отсутствие смещения оценки со временем. Алгоритм обладает сравнительно хорошей монотонностью и быстродействием и в следствии применения DREM простой настройкой параметров фильтров, обеспечивающих лучшее быстродействие.

В [3] представлен алгоритм оценки частот не смещенного полигармонического сигнала. Алгоритм основывается на применении DREM и стандартной градиентной оценки и обеспечивает экспоненциальную сходимости к нулю ошибки оценивания. Главным достоинством алгоритма является обеспечение не строгой монотонности.

Предлагаемые в этой работе алгоритмы расширяют работу [3, 4], позволяя оценивать все параметры сигнала, и выделяют преимущества параметризации с запаздыванием.

Постановка задачи

Рассматривается измеряемый сигнал

$$y(t) = \sigma + \sum_{i=1}^{k} \mu_i sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

где параметры $\sigma_i, \omega_i, \mu_i, \phi_i$ предполагаются постоянными. Пусть сигнал (1) удовлетворяет следующим допущениям:

Допущение 1: Количество гармоник k известно.

Допущение 2: Известно минимальное частотное расстояние между любыми парами гармоник δ_0.

Допущение 3: Известна минимальная частота ω_0.

Допущение 4: Частоты гармоник исследуемого сигнала различны.

Необходимо разработать три алгоритма оценки параметров сигнала и провести сравнительный анализ результатов с точки зрения монотонных свойств и времени

оценивания, и на основе анализа этих оценок выявить наиболее эффективный способ оценки параметров. Оценки должны экспоненциально сходиться к истинным значениям.

Алгоритм 1

Задачей первого алгоритма является улучшение качества оценивания параметров по сравнению с методом, предложенным в статье [1], за счет применения DREM, что облегчит настройку алгоритма, даст возможность независимо настраивать оценку каждой компоненты вектора параметров. Более того, это позволит улучшить монотонные качества оценок и облегчит настройку фильтров.

В отличии от статьи [3], где впервые был использован DREM для оценки частот, в алгоритме будут оцениваться все параметры сигнала (1).

Первый алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Параметризовать генератор сигнала (1) в виде: $y^{(2k+1)} = \Theta_1 \ y^{(2k-1)} + \Theta_2 \ y^{(2k-3)} + \ldots + \Theta_k \ y^{(1)}$, в котором $\Theta(\{\omega_i\})$, где $i = \overline{1,\ k}$.

2. Пропустить полученный регрессор через k фильтров вида $\mathrm{H_i(p)} = \frac{\lambda_i^{2k+1}}{(p+\lambda_i)^{2k+1}}$ где $\lambda_i \neq \lambda_j, \ \forall i \neq j$. Произвести смешивание полученных скалярных регрессоров.

3. Применить стандартную градиентную оценку к регрессору, полученному в пункте 2. Произвести расчет оценок частот и общего смещения.

4. На основе оценок частот и смещения произвести расчет амплитуд и фаз гармоник исходного сигнала.

На рис. 1 вы можете видеть результаты моделирования первого алгоритма для сигнала из двух гармоник. Среднее значение времени оценивания смещения составляет примерно 7.2 секунды, частот 9.4 секунды, фазовых смещений 11.17 секунд, амплитуд 9.7 секунд. Здесь и в дальнейшем, под временем переходного процесса понимается время окончательного попадания оценки в 5-% окрестность истинного значения параметра.

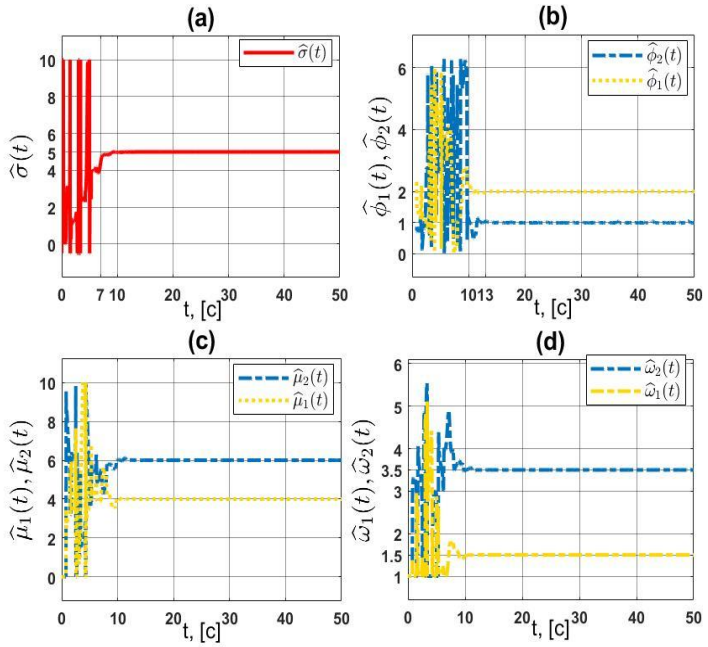


Рис. 1. Оценивание смещения (a), фаз (b), амплитуд (c), частот (d) сигнала $y(t) = 5 + 4sin(1.5t + 2) + 6sin(3.5t + 1)$, $\Gamma = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$, $\lambda_1 = 1.4$, $\lambda_2 = 2$

Алгоритм 2

Одним из недостатков первого алгоритма является применение k различных динамических фильтров в дреме, что приводит к образованию k различных экспонент, которые в свою очередь уменьшают время оценивания и ухудшают монотонность. Поэтому для улучшения качества оценивания, задачей данного алгоритма является уменьшение влияния этих экспонент на процесс оценивания. Для этого для расширения регрессора применяются операторы задержки. Второй алгоритм состоит из шагов:

1. Параметризовать генератор сигнала (1) в виде: $y^{(2k+1)} = \Theta_1\ y^{(2k-1)} + \Theta_2\ y^{(2k-3)} + \ldots + \Theta_k\ y^{(1)}$, в котором $\Theta(\{\omega_i\})$, где $i = \overline{1,\ k}$.

2. Получить доступный измерению регрессор с помощью применения фильтра вида $H(p) = \frac{\lambda^{2k+1}}{(p+\lambda)^{2k+1}}$ к регрессору, полученному в пункте 1.

3. Пропустить полученный регрессор через k-1 фильтров вида $[H_i(*)](t) = (*)(t - d_i)$ где $d_i \neq d_j,\ \forall i \neq j$. Произвести смешивание полученных скалярных регрессоров.

4. Применить стандартную градиентную оценку к регрессору, полученному в пункте 3. Произвести расчет оценок частот и общего смещения.

5. На основе оценок частот и смещения произвести расчет амплитуд и фаз гармоник исходного сигнала.

На рис. 2 вы можете видеть результаты моделирования второго алгоритма. Среднее значение времени оценивания смещения составляет примерно 6.6 секунды, частот 6.64 секунды, фазовых смещений 8.35 секунд, амплитуд 6.66 секунд. Сравнение оценок параметров позволяет говорить о превосходстве во времени оценивания второго алгоритма в среднем на 2.5 секунды по каждому из параметров по отношению к первому алгоритму. Кроме того, второй алгоритм имеет лучшие монотонные качества оценивания чем первый. Особенно ярко это выражено в оценке смещений.

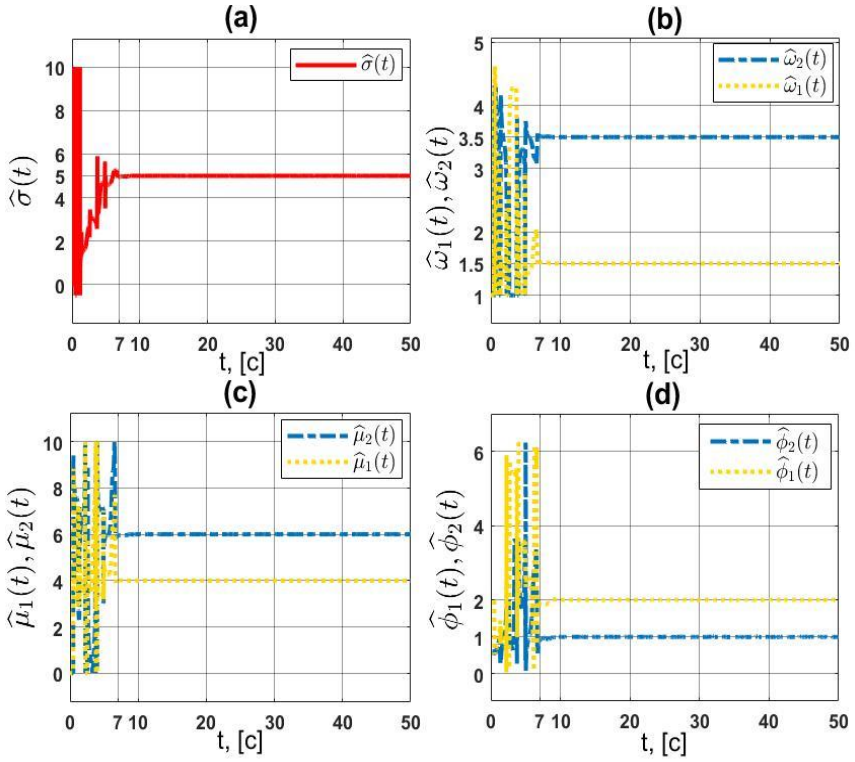


Рис. 2. Оценивание смещения (a), частот (b), амплитуд (c), фаз (d) сигнала $y(t) = 5 + 4\sin(1.5t + 2) + 6\sin(3.5t + 1)$, $\Gamma = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$, $\lambda = 2$, $d = 0.2$[c].

Алгоритм 3

Уменьшение влияния экспонент во втором алгоритме за счет замены k различных экспонент k экспонентами с запаздываниями, исходя из результатов, дало положительный эффект. Поэтому для дальнейшего улучшения качества оценивания задачей третьего алгоритма является устранение этих экспонент в регрессоре. Для этого при формировании и для расширения регрессора все динамические фильтры заменяются операторами задержки.

3-ий алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Получить генератор сигнала (1) с помощью двух операторов задержки вида $[H_i(*)](t) = (*)(t - \tau_i)$. Брать кратные величины задержек $\tau,\ 2\tau$. Причем $\tau = {}^{\pi}/_{\overline{\omega}}$.
2. Применить оператор задержки вида $[H(*)](t) = (*)(t - d)$, где $d \neq \tau,\ 2\tau$ для расширения регрессора, полученного в пункте 1. Произвести процедуру смешивания регрессоров.
3. Применить стандартную градиентную оценку к регрессору, прошедшему DREM.
4. Ввести оценку, основанную на оценке градиентного алгоритма, имеющую конечную по времени длительность точного оценивания. Произвести расчет оценок частот и смещения.
5. Получить новый регрессор, позволяющий произвести оценку амплитуд и фаз, на базе сигнала (1) с учетом оценок частоты и смещения.
6. Применить процедуру DREM к полученному регрессору. Для расширения регрессора применить оператор задержки вида $[H(*)](t) = (*)(t - \tau)$.
7. Применить стандартную градиентную оценку к регрессору, прошедшему DREM.
8. Ввести оценку, основанную на оценке градиентного алгоритма, имеющую конечную по времени длительность точного оценивания. Произвести расчет оценок амплитуды и фазы сигнала (1).

На рис. 3 вы можете видеть результаты моделирования последнего алгоритма. Время оценивания смещения составляет примерно 0.82 секунды, частоты 0.83 секунды, фазового смещения 1.37 секунды, амплитуды 3.2 секунды. Сравнение оценок параметров позволяет говорить о превосходстве во времени оценивания третьего алгоритма в среднем на 7.9 секунды по каждому из параметров по отношению к первому алгоритму и на 5.5 секунды по каждому из параметров по отношению ко второму алгоритму. Более того, очевидно, что последний алгоритм имеет лучшие монотонные качества оценивания по всем параметрам среди рассмотренных в работе.

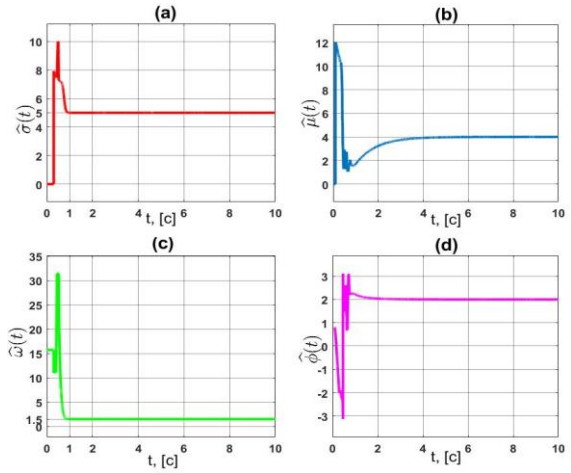


Рис. 3. Оценивание смещения (a), амплитуды (b), частоты (c), фазы (d) сигнала

$y(t) = 5 + 4sin(1.5t + 2)$, $\Gamma = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \tau = 0.1[c], d = 0.3[c]$.

Для наглядности, в таблицу сведены значения времени оценивания параметров по всем трем алгоритмам.

Таблица

Время оценивания параметров

	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3
Время оценки σ, [с]	7.211	6.58	0.823
Время оценки ω_1, [с]	9.127	6.626	0.83
Время оценки ω_2, [с]	9.709	6.665	-
Время оценки ϕ_1, [с]	11.798	8.45	1.374
Время оценки ϕ_2, [с]	10.551	8.252	–
Время оценки μ_1, [с]	9.73	6.658	3.201
Время оценки μ_2, [с]	9.744	6.663	–

Заключение

Были спроектированы три алгоритма параметрической онлайн идентификации полигармонического сигнала со смещением и выявлено преимущество параметризации с запаздыванием.

Стоит отметить, что недостатком первых двух алгоритмов является способ образования регрессора, который приводит к появлению неподлежащей оценке экспоненте. Поскольку в Алгоритме 2 для расширения регрессора используется не динамический фильтр, который не приводит к образованию этой экспоненты, то качества оценивания у Алгоритма 2 чуть лучше с точки зрения монотонности и быстродействия. В отличии от них, Алгоритм 3 лишен этого недостатка, и поэтому, с теоретической точки зрения, имеет конечную по времени и нулевую установившеюся ошибку оценивания. Поэтому Алгоритм 3 наиболее эффективен. Но важно понимать, что на практике невозможно добиться нулевой ошибки оценивания за конечное время (даже когда это теоретически возможно) из-за конечной точности численного интегрирования.

В дальнейшем планируется расширить область применения Алгоритма 3 для оценки произвольного конечного количества гармоник и глубже рассмотреть применение алгоритмов в системах подавления вибраций в летательных аппаратах и в системах динамической стабилизации качки катеров.

Литература

1. Пыркин А.А., Бобцов А.А., Ведяков А.А., & Колюбин С.А. (2015). Оценивание параметров полигармонического сигнала. Автоматика и телемеханика. (8). 94-114.
2. Vedyakova A., Vedyakov A., Bobtsov A., and Pyrkin A. “DREM-based Parametric Estimation of Bias-affected Damped Sinusoidal Signals”.
3. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., & Pyrkin A. (2016). Improved transients in multiple frequencies estimation via dynamic regressor extension and mixing. IFAC-PapersOnLine. 49(13). С. 99-104.
4. Aranovskii S.V., Bobtsov A.A., Kremlev A.S., Luk’yanova G.V., & Nikolaev N.A.E. (2008). Identification of frequency of a shifted sinusoidal signal. Automation and Remote Control. 69(9). С. 1447-1453.

СОДЕРЖАНИЕ

ПОБЕДИТЕЛИ КОНКУРСА НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»……... 5
Звягинцева Д.А.
ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ОТКРЫТОЙ КВАНТОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ……... 6
Сергеева Д.В.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ В МЕЖДУГОРОДНЕМ СООБЩЕНИИ…….. 13
Туманян И.А.
РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ И ОЦЕНКА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ХЛЕБА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОБАВОК…….. 18
Щедрина Н.Н.
ЛАЗЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СМАЧИВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ……. 23
ЛАУРЕАТЫ I СТЕПЕНИ КОНКУРСА НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»……... 30
Александрова М.В.
РАЗРАБОТКА РЕАБИЛИТАЦИОННОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ДЛЯ ПАЦИЕНТОВ С НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА……... 31
Артемьев Д.В.
ВЫБОР СООТВЕТСТВУЮЩЕГО КРИОГЕННОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ОЖИЖИТЕЛЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ…… 38
Корженевский Ю.Г.
ТРОЙНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, ПОЛИМЕРОВ И ФУЛЛЕРЕНОВ……... 43
Михтанюк С.Е.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗВЕТВЛЁННЫХ ЛИЗИНОВЫХ МОЛЕКУЛ С ПЕПТИДАМИ GED И ED МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ…… 49
Огирь К.С.
ПРОЕКТ МОДУЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ…….. 55
Тищук Б.Ю.
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕДВЫБОРКИ ДАННЫХ ДЛЯ КЭШ-ПАМЯТИ ПЕРВОГО УРОВНЯ ДЛЯ ПРОЦЕССОРОВ С АРХИТЕКТУРОЙ RISC-V…….. 61

ЛАУРЕАТЫ II СТЕПЕНИ КОНКУРСА НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»……... 67
Быков Д.И.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АНОМАЛОСКОПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ…….. 68
Егорова Е.Е.
ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА…… 74
Ерёменко А.А.
МЕТОДЫ И ЛУЧШИЕ ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО СИМБИОЗА ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ…….. 81
Кирилова С.А.
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕПЕТИЦИОННЫХ ЗАНЯТИЙ…….. 87
Крикун А.А.
РАЗРАБОТКА МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ДИФФИ-ХЕЛЛМАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ……... 94
Матюшкина А.А.
СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНИТО-ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОКОМПОЗИТОВ…….. 100
Сивцов В.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ…….. 107
Солнцев В.М.
РАЗРАБОТКА НИЗКОУРОВНЕВОГО МОДУЛЯ ИНТЕРПРЕТАТОРА ESPRUINO ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С ПОМОЩЬЮ JAVASCRIPT……..... 114
Хусаинов А.Р.
ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА СВЯЗЕЙ МЕЖДУ МЕТРИКАМИ ПО МНОЖЕСТВУ ЭКСПЕРИМЕНТОВ……... 119
ЛАУРЕАТЫ III СТЕПЕНИ КОНКУРСА НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»……... 126
Ал-Наим Р.И.
ДЕТЕКЦИЯ ЛИНИЙ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ……. 127
Казакова Е.С.
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ СРЕДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОДА..... 133
Плотникова Д.А.
РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВИДЕОМЭППИНГА ДЛЯ ВЫСТАВКИ «КОГДА ДЕРЕВО СТАНЕТ КАМНЕМ» МАСТЕРСКОЙ М.К. АНИКУШИНА…….. 140
Рогатюк А.Ю.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИРОЭФФЕКТА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛНОВОДА В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ……. 146

Романова А.В.
ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ В РАДИОЧАСТОТНЫХ ЛОВУШКАХ……... 151
Сацюк К.А.
ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКЦИИ КРАХМАЛА «С» ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОЭТАНОЛА…… 158
Трифонова А.О.
РАЗРАБОТКА СЕГМЕНТА ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЕТИ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕЛЕМАТИКИ ПО ДОРОГЕ А-181 НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ LPWAN…… 163
УЧАСТНИКИ КОНКУРСА НА «ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО»……...…… 170
Алибутаев А.К.
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДВУХФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ С ПОМОЩЬЮ БИОМЕТРИЧЕСКОГО СКАНЕРА МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА…….. 171
Альмаметова А.Б.
ВЛИЯНИЯ АНТИВИРУСНЫХ ПРОГРАММ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ASTRA LINUX……..... 177
Антропов Д.В.
РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ……. 183
Бейлин М.Т.
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ……. 188
Бененсон Е.А.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОВОРОТА ОБЪЕКТА…….. 194
Бобко Р.А.
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УЛЬТИСТРОЧНОГО ДИСПЛЕЯ БРАЙЛЯ…… 201
Богданов К.С.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЭКО ПАРК»…… 208
Бородина Л.Н.
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ BAYFOL HX……..... 214
Васильев И.А.
ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ……. 221
Галашева Е.Н.
СЕНСОР ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ РОДАМИНА Б, ИММОБИЛИЗИРОВАННОГО В ГИДРОГЕЛЕВОЙ ПЛЁНКЕ……. 228
Голобородько Л.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ……. 232

Голованов А.А.
РАЗРАБОТКА ПРОТОКОЛА ЗАЩИЩЁННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ АНОНИМНОГО ГОЛОСОВАНИЯ……. 237
Дакуо Ж.-М. Н.
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМУ
КРИПТОАНАЛИЗУ БЛОЧНЫХ ЛЕГКОВЕСНЫХ ШИФРОВ……..... 243
Делец Е.И.
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
СЕТЕВЫХ АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ФЕДЕРАТИВНОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ…… 250
Елсакова П.А.
НАПИТОК НА ОСНОВЕ ФИТОСЫРЬЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА МИКРООРГАНИЗМОВ…… 255
Ковалева Д.А.
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОРФОМЕТРИИ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ДРОЖЖЕЙ…….. 261
Красноперова Е.В.
АНАЛИЗ И ПРЕДСКАЗАНИЕ РЕЙТИНГА
ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СЕРИАЛОВ..... 266
Кротиков Г.М.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ
СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА СООТВЕТСТВИЕ
ТРЕБОВАНИЯМ ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ……. 272
Кущенко О.М.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ФРАКТАЛЬНЫХ
И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМООРГАНИЗОВАННЫХ
ДЕНДРИТНЫХ СТРУКТУР CdTe КВАНТОВЫХ ТОЧЕК……... 278
Лекшин П.А.
РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ УМНОГО ДОМА……..... 283
Маковецкая А.В.
ФОРМИРОВАНИЕ И ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CdSe КВАНТОВЫХ
ТОЧЕК И НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА…… 290
Мамжиева М.А.
ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ
С МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ…… 298
Нкодиа Д.-К.
РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА СЕТЕВОГО ТРАФИКА
ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ……. 303
Пасечный Д.С.
РАЗРАБОТКА ПОРОШКООБРАЗНОГО
КОНЦЕНТРАТА БЕЗАЛКОГОЛЬКОГО НАПИТКА……. 309
Подколзина С.С.
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПАКОВКИ
ОБЪЕКТОВ В ФИГУРУ НЕПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ……. 317
Степанова М.С.
КОНФОКАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК…….. 322

Уткин Ф.Р.
РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ API С УСКОРЕНИЕМ ОБРАБОТКИ ЗАПРОСОВ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ…… 330
Фьерро Нуньес Х.К.
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАСТЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ СРЕДОЙ…….. 335
Шлямова Е.Е.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ВЗГЛЯДА НА ОСНОВЕ МИКРОКОМПЬЮТЕРА RASPBERRY PI…….. 341
Яицкий А.А.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК ИНФОРМАЦИИ В ЗАЩИЩЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ВАГОНА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОЕЗДА МЕЖДУГОРОДНЕГО СООБЩЕНИЯ “САПСАН”…… 347
Яковлева В.Е.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МЕТОДА ПОВТОРНОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ…… 352
Ячменьков М.М.
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СМЕЩЕННОГО ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЗА КОНЕЧНОЕ ВРЕМЯ……. 359

Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров Университета ИТМО

Сборник трудов

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Дизайн обложки Н.А. Потехина
Вёрстка Я.Я. Платунова
Подписано к печати 24.12.2020
Заказ № 4376 от 24.12.2020
Тираж 100 экз.

Печатается в авторской редакции

Отпечатано: Учреждение «Университетские коммуникации»
199034, Санкт-Петербург, В.О., Биржевая линия, 16