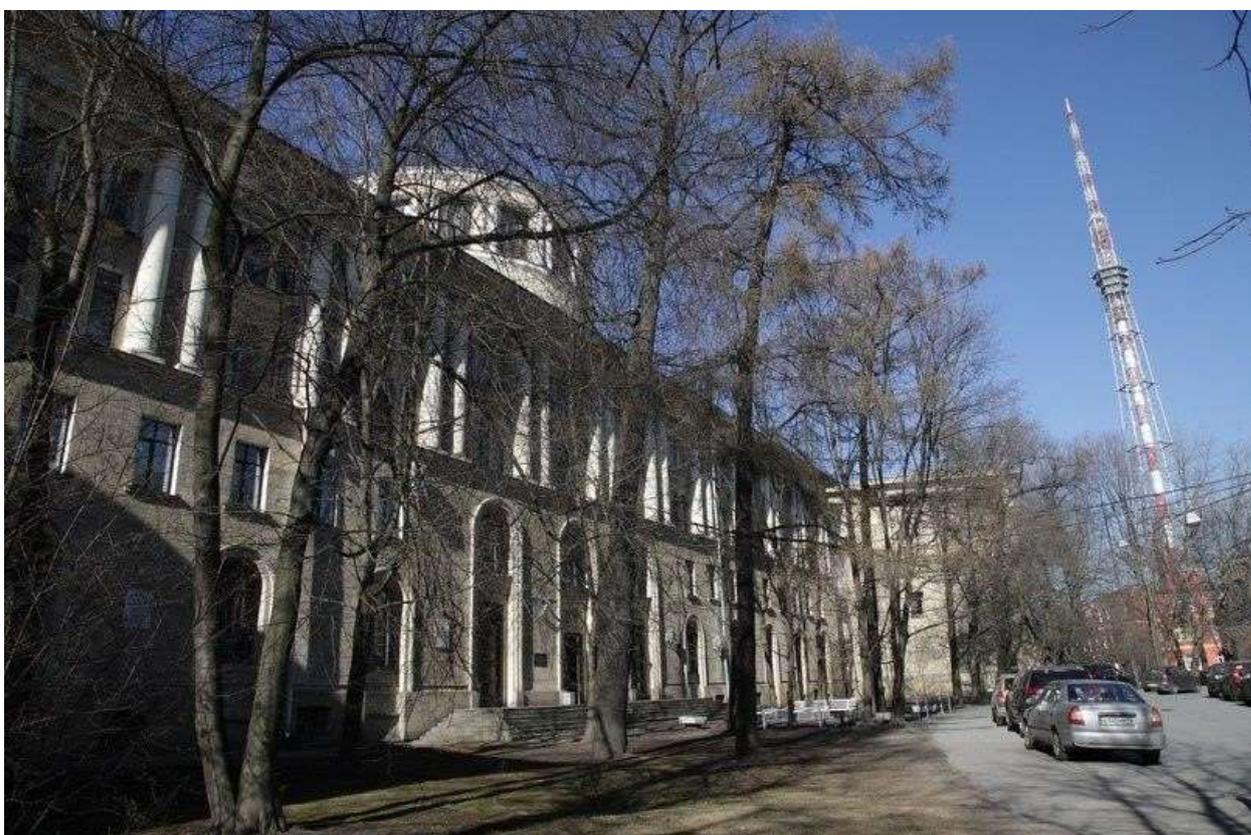


Министерство образования и науки РФ  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**X НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**



**Сборник материалов конференции  
19 – 21 мая 2022**

Том II

Санкт-Петербург  
2022

**УДК 001.2**

**X НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО» ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ. Том 1. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 207 с.**

**Организаторы:**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, АО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ВЕКТОР», ООО «Ультразвуковая техника - ИНЛАБ», дочерние общества и организации ПАО «Газпром».

**Тематика конференции включает следующие направления**

- *Биотехнические системы и технологии*
- *Приборостроение*
- *Техносферная безопасность*
- *Электропривод, автоматика и энергосбережение*
- *Мехатроника и робототехника*
- *Лингвистика*
- *Информатика и управление в технических системах и ВТ*
- *Системный анализ и информационная безопасность*
- *Прикладная математика и программная инженерия*
- *Алгоритмическая математика*
- *Искусственный интеллект в прикладных областях*
- *Электроника, нанотехнологии, наноматериалы*
- *Технологическое предпринимательство: от проектного замысла к рыночному позиционированию*
- *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*

Сборник материалов содержит доклады, представленные на X Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, состоявшейся 19 – 21 мая 2022 года в Санкт-Петербурге. Основной задачей конференции является развитие творческой активности студентов, привлечение их к решению актуальных задач в области науки и техники. Все доклады проходят рецензирование.

**Научно-практическая конференция проведена при финансовой поддержке  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ».**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СЕКЦИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ</b> .....	7
Ю.С. Воротынцева ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ФАКТОРА ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ РАССТОЯНИЙ В АСТРОНОМИИ ПУТЁМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ .....	7
А.А.Губина, М.М.Романович, Е.Левин, И.А. Ламкин ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА НА РАЗВИТИЕ ЛИСТОВОГО САЛАТА В СТАДИИ ПРОРАЩИВАНИЯ .....	11
М.А. Малыга, И.А.Просолов, К. Г.Антоненко, В.С.Горяинов ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРЕЛЛЫ .....	14
О.Н. Мальцева, А.Ю. Аксенов МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОТЕЗА СТОПЫ НА 3D ПРИНТЕРЕ ДЛЯ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОХОДКИ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОАНАЛИЗА.....	16
А. Хасанов РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАРБОНОВЫХ ЭМИССИЙ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ .....	21
А.Д. Шарнин, М.М. Романович, И.А. Ламкин.....	25
РАЗРАБОТКА СВЕТОДИОДНОГО ФИТОИЗЛУЧАТЕЛЯ С АДАПТИВНЫМ К ЦВЕТОВОМУ ВОСПРИЯТИЮ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ .....	25
<b>СЕКЦИЯ БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	29
М.В. Богданова, Н.О. Ситков, Т.М. Зимина ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ МИКРОФЛЮИДНОЙ ПОДСИСТЕМЫ СМЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ.....	29
А.С. Бойко, А.А.Пономарева РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ ЧАСТИЦ УГЛЯ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ .....	33
К.Е.Брусина РАЗРАБОТКА МИКРОФЛЮИДНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ЭКСПРЕСС- АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА .....	37
А.Е. Гапаненко ПРОТОТИП АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ ПАЦИЕНТА НА БИНОУРАЛЬНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	41
Д.Д. Логинова ВЛИЯНИЕ BLUETOOTH-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЯГКИЕ ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА .....	44
Р.Р. Сибгатов, Т.М. Зимина СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОНАСОСОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ИОННОГО ПЕРЕНОСА, ИМЕЮЩИХ ПОТЕНЦИАЛ ИНТЕРИРОВАНИЯ В ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ .....	48

О.А. Смирнова ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНОЙ ПОРТАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОАНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЛКОВЫХ СТРУКТУР .....	53
Е.М. Соколова, А.А. Пономарева РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ СОЕДИНЕНИЙ КОБАЛЬТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ .....	55
А.Д. Трошева ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СПОРТЕ. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ANYLOGIC .....	59
<b>СЕКЦИЯ ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ .....</b>	<b>63</b>
М.И. Семенова, Ю.А. Гудырёва, Е.А. Асташков ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЦЕТОНА В КАЧЕСТВЕ ЭКСТРАГЕНТА В БИОТЕСТОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	63
Д.Б. Блохин, Е.Г. Казанина РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ КЛАССА ОПАСНОСТИ ОТХОДОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИВИНИЛФТОРИДА .....	67
Х.Д. Бобоев ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ .....	71
А.В. Забоева, А.А. Симоненко, А.С. Ковалевская, М.И. Семенова ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕСТ-РЕАКЦИИ ПРОСТЕЙШИХ И БАКТЕРИЙ .....	75
Е.В. Зимин, К.А. Порохненко, Я.А. Хвощевская РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПО СОРТИРОВКЕ И ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ .....	78
Д.А. Зуева, Н.А. Березникова ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИЧИНОК НЕКОТОРЫХ НАСЕКОМЫХ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКА .....	80
Е.Н. Комлева КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КАРЬЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ .....	83
П. В. Манахова, Ю. С. Максимишина ОСОБЕННОСТИ ЭТАПОВ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ .....	86
П. В. Манахова, Т.В. Кустов, М.И. Семенова, Ю. С. Максимишина ОСОБЕННОСТИ ЭТАПОВ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ .....	90
А.Д. Мухаметзянова ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ УСТОЙЧИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	94
Е.А. Пономарева ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗВРАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦИКЛ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ HDPE .....	97

А.В. Забоева, А.А. Симоненко, А.С. Ковалевская, М.И. Семенова ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕСТРЕАКЦИИ ПРОСТЕЙШИХ И БАКТЕРИЙ .....	100
А.В. Герасимов, А. Соколов, А. С.Ковалевская, А.А Скосырская АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ КОНЦЕНТРАТОМЕРА БИОТЕСТЕР 2М .....	104
Е.В. Зимин, К.А. Порохненко, Я.А. Хвощевская РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПО СОРТИРОВКЕ И ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ .....	108
<b>СЕКЦИЯ ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ВТ .....</b>	<b>110</b>
Naveen, Alexey A. Paznikov SEVERAL ASPECTS ON IMPLEMENTATION OF LOCK-FREE ATOMIC SNAPSHOT FOR HIGH PERFORMANCE COMPUTING IN MPI REMOTE MEMORY ACCESS MODEL.....	110
А.В. Андреев ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ИДАВАНГ АГРО ПО МОДЕЛЯМ НИТРИФИКАЦИИ И ДЕНИТРИФИКАЦИИ.....	114
О.А. Графина МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ОПУХОЛИ.....	119
М.А. Львов РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В СОСТАВЕ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ .....	123
Б.М. Маджидов, Г.В. Файзиев ПЕРСПЕКТИВЫ НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	127
М.Л. Немцов НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА (FUZZY LOGIC) В СИСТЕМАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....	130
В. А. Басыров, Д. Р. Павлов, Р. А. Поршнева, И. Л. Шейнман ВИРТУАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ТЕОРЕМЫ ГЮЙГЕНСА — ШТЕЙНЕРА МЕТОДОМ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	134
Д.Р. Павлов, Р.А. Поршнева, И.Л. Шейнман ВИРТУАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ .....	138
П.Л. Федотов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ЗЛОКАЧЕСТВЕННОЙ ОПУХОЛИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....	143
<b>СЕКЦИЯ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ .....</b>	<b>147</b>
О.В. Григорьева МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИЕМА ЭКСТРЕННЫХ ПАЦИЕНТОВ В СТАЦИОНАРНОМ ОТДЕЛЕНИИ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ .....	147
Е.Е. Допира, Н.А. Назаренко ПРОБЛЕМЫ НЕЗРЯЧИХ И СЛАБОВИДЯЩИХ ЛЮДЕЙ ПРИ РАБОТЕ С ИНТЕРФЕЙСАМИ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ .....	<b>ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.</b>

В.Д. Туманова, Л.А. Шумилов СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НОУТБУКОВ .....	154
<b>СЕКЦИЯ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ .....</b>	<b>158</b>
А.Я. Кирсанов, А.И. Сучков ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ.....	158
Н.С. Лукашов, А.А. Беляева АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА В ВИРТУАЛЬНОМ ФУТБОЛЕ .....	162
Д.А. Ушаков РЕАЛИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БИЗНЕС-ИНСТРУМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ REST API .....	166
<b>СЕКЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА .....</b>	<b>170</b>
В.О. Дубова ВИЗУАЛИЗАТОР НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГРАФА ПЛОСКИХ РАЗБИЕНИЙ .....	170
Р.П. Черепанов, Д.С. Емельянов ВЫЯВЛЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОВЫШЕНИЯ НАУКОМЕТРИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ .....	172
В.А. Жуков, Э.С. Пахаревская АЛГОРИТМЫ КАРТОЧНЫХ ИГР С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИПТОГРАФИИ БЕЗ ОДНОСТОРОННИХ ФУНКЦИЙ.....	175
Д.Г. Зайков СИСТЕМА WISE TASKS GRAPHS .....	177
М.А. Кривоконь, А.А. Артамонов ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ШТЕЙНЕРА .....	181
А.Д. Кузьмин ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМА RSK .....	184
А. Максимова ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЛИН ЦИКЛОВ ШЮТЦЕНБЕРЖЕ НАД ТАБЛИЦАМИ ЮНГА.....	187
Ф. Михайлов ВЫЧИСЛЕНИЕ РАЗМЕРНОСТЕЙ КОМПОНЕНТ ТРОПИЧЕСКИХ ПРЕДМНОГООБРАЗИЙ В ПАКЕТЕ GFAN .....	190
<b>СЕКЦИЯ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРИКЛАДНЫХ ОБЛАСТЯХ .....</b>	<b>193</b>
В.И. Андреев ИНСТРУМЕНТ КАРТИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПО ДАННЫМ ФМРТ .....	193
А.Э. Слепов МОДУЛЬ ПОСТРОЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ К ОНТОЛОГИЧЕСКИМ БАЗАМ ЗНАНИЙ .....	197
К.А. Уваров ПОДДЕРЖАНИЕ БДИТЕЛЬНОСТИ ВОДИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПОМОЩЬЮ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ .....	201

## СЕКЦИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ФАКТОРА ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ РАССТОЯНИЙ В АСТРОНОМИИ ПУТЁМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ю.С. ВОРОТЫНЦЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Данный доклад представляет собой описание нового метода оценки фактора, являющегося источником погрешности при определении расстояний до астрономических объектов. Описываемый метод применяет анализ цифровых данных обработанных изображений, и, на основе некоторых разработанных функциональных зависимостей, применяемых к полученным в ходе анализа данным, позволяет вычислить реальные значения фактора погрешности. Определение расстояний в астрономии является одной из ключевых задач, поэтому важно выполнять её с как можно большей точностью, то есть исключать возможные источники погрешностей при измерениях, что, в свою очередь, является одной из важнейших целей метрологии — обеспечение как можно большей точности измерений. Разработанный метод, описываемый в докладе, может выполнить поставленную задачу.

*Ключевые слова:* оценка погрешности, точность измерений, анализ изображений, обработка изображений, определение расстояний в астрономии

Настоящий метод подразумевает наличие входных данных — трёх фотографий, на которых изображена область небесного свода с астрономическим объектом, называемым тёмной туманностью. Первое изображение — фотография туманности, сделанная с В-фильтром, то есть в синих лучах, которым соответствует длина волны 4400 ангстрем. Второе изображение — фотография этого же астрономического объекта, сделанная с R-фильтром — в красных лучах с длиной волны 7000 ангстрем. Обе фотографии сделаны в оптическом, визуальном диапазоне — то есть в той области, которая доступна человеческому глазу. Третье изображение — фотография той же туманности, только в инфракрасном диапазоне, при помощи К-фильтра, с длиной волны 22000 ангстрем.

Инфракрасный диапазон недоступен визуальным наблюдениям, поэтому фотографические данные этого изображения дают возможность увидеть то, что не воспринимается человеческим глазом. Важно отметить — на всех изображениях находится один и тот же объект, изображения должны иметь одинаковое разрешение и экспозицию.

Тёмные туманности представляют собой, с метрологической точки зрения — источник погрешности при определении расстояний до излучающих астрономических объектов, например, звёзд, так как тёмные туманности есть облака межзвёздной пыли, проходя сквозь которые свет поглощается и испытывает ослабление и кажется более красным. Существует множество способов определений расстояний, основанных на методах астрономии и астрофизики. Один из популярных — по видимым и абсолютным звёздным величинам по формуле:

$$\lg r = 1 + 0.2(m - M). \quad (1)$$

Звёздная величина — это некоторая мера наблюдаемого потока излучения от небесного объекта, или же создаваемая им освещённость  $E$ , которая определяется как поток излучения, падающий на площадку поверхности (например, светоизмерительного прибора).

Звёздная величина — это логарифм по основанию 2.512 от освещённости, создаваемой данным объектом, взятый со знаком минус. Если два объекта, с освещённостями  $E_1$  и  $E_2$  соответственно имеют звёздные величины  $m_1$  и  $m_2$ , то справедливы следующие соотношения из определения:

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = -0.4(m_1 - m_2) \quad (2)$$

Обратимся теперь к явлению ослабления света, вызываемого межзвёздным поглощением, благодаря которому видимая звёздная величина небесного объекта кажется нам больше по значению, то есть объект выглядит «тусклее», чем он есть на самом деле. Тогда, если в формулу для определения расстояния до объекта мы подставим неверное значение видимой звёздной величины, мы получим ошибку в расстоянии, причём она может оказаться весьма существенной.

Если видимая звёздная величина данного объекта равна  $m$  и если величина межзвёздного поглощения равна  $\Delta m$ , то освещённость от объекта на самом деле соответствует не  $m$ , а  $m - \Delta m$  и формула для определения расстояний должна записываться следующим образом:

$$\lg r = 1 + 0.2(m - M - \Delta m). \quad (3)$$

Следовательно, данное явление может давать весомые погрешности при определении расстояний. Чем точнее будет определена величина ослабления потока излучения за счёт поглощающих свойств межзвёздной пыли, тем точнее мы сможем в дальнейшем измерять расстояния до объектов, уменьшая вызванную явлением поглощения погрешность.

В этом и заключается цель настоящей работы — в определении величины межзвёздного поглощения.

Из вышесказанного ясно, что фотографии в данном методе дают информацию об освещённостях. Различным длинам волн соответствуют различные освещённости, а, следовательно, различные звёздные величины. Благодаря такой возможности измерений можно определять цвета звёзд, при помощи показателей цвета.

Показатель цвета — это некая количественная мера цвета астрономического объекта. Объект фотографируют с применением двух с различных фильтров и сравнивают полученные звёздные величины по освещённостям, вычитая величину, определенную при помощи фильтра с большей длиной волны  $\lambda_2$ , из той, что определена с фильтром с меньшей длиной волны  $\lambda_1$ :

$$CI = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}, \quad (4)$$

где полученная разность  $CI$  называется показателем цвета или колор-индексом (color index). Здесь основной момент в том, что излучение разных цветов будут давать более или менее интенсивные освещённости в различных фильтрах. Различные колор-индексы записываются как разница между звёздными величинами в лучах, соответствующих определенному фильтру, например,  $(B - R)$ .

Фотографии в оптическом диапазоне не могут отображать освещённость от звёзд, находящимися за поглощающей туманностью, а при применении инфракрасного фильтра их излучение становится доступным. Таким образом, сравнивая освещённости

в оптических диапазонах (красные и синие лучи) с освещенностью в ИК-диапазоне, мы сможем оценить, какое количество света поглощает туманность.

Для этого необходимо получить количественную меру освещенности в альтернативных единицах с фотографий, которые будут соответствовать альтернативным звёздным величинам в  $B$ ,  $R$  и  $K$ -лучах — данные с первой, второй и третьей фотографии соответственно. Для этого мы загружаем цветные изображения в программную среду, преобразуем их сначала в серые изображения, а затем полученные изображения в серой гамме — в строго чёрно-белые — бинарные изображения, используя половинный порог бинаризации, равный 125: все тона пикселей в серой шкале определяются от 0 до 255, где 0 — чёрный цвет, 255 — белый. Все пиксели, что больше или равны 125, становятся полностью белыми, им присваивается значение 1, а другим, что меньше порога — значение 0, и такие пиксели становятся чёрными:

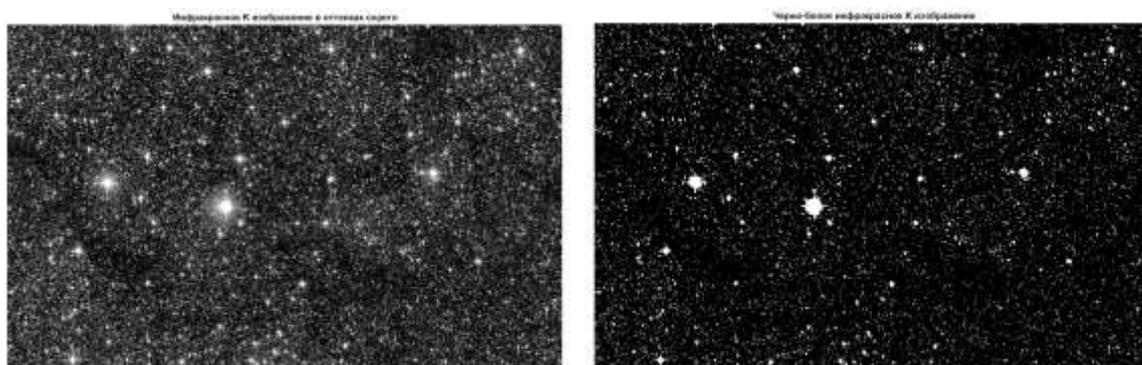


Рис. 1. Пример бинаризации ИК-изображения. Слева — в шкале серого, справа — бинарное/

Далее при помощи программы подсчитаем количество белых пикселей на изображении, то есть количество пикселей со значением 1 — это и будет альтернативной мерой освещенности.

Далее вычислим экспериментальные показатели цвета ( $B - R$ ) и ( $B - K$ ), объединяя формулы (1) и (4), где освещенностью является число белых пикселей. Если бы не было межзвездного поглощения, то визуальному показателю ( $B - R$ ) соответствовал бы другой теоретический показатель ( $B - K$ ), так как в этом случае не отображались бы «лишнее» излучение звёзд, которое фиксируется в ИК-диапазоне. Определяя разницу между теоретическим и экспериментальным показателями ( $B - K$ ), мы получим долю поглощаемого излучения — то есть величину, характеризующую, насколько ослабляется свет, проходя через рассматриваемую туманность.

Чтобы определить, какой колор-индекс ( $B - K$ ) соответствует экспериментальному ( $B - R$ ), построим по точкам зависимость ( $B - K$ ) — ( $B - R$ ) по предварительно выведенным колор-индексам ( $B - K$ ) и ( $B - R$ ) известным табличным данным показателей цвета ( $B - V$ ), ( $V - R$ ), ( $V - K$ ) применяя программу, реализующую подгонку формулы для нелинейной зависимости полиномом 6-го порядка:

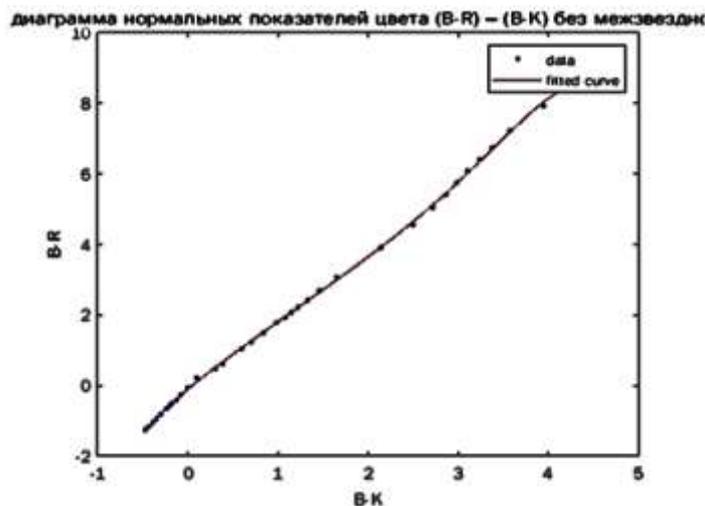


Рис. 2. Зависимость  $(B - K) - (B - R)$ .

Вычисляем теоретический колор-индекс  $(B - K)$  по вычисленной программой полиномиальной формуле:  $BK_{th} = -0.005064 \times (BR_{exp})^6 + 0.04941 \times (BR_{exp})^5 - 0.1814 \times (BR_{exp})^4 + 0.3685 \times (BR_{exp})^3 - 0.4562 \times (BR_{exp})^2 + 2.137 \times (BR_{exp}) - 0.1068$ ,

где  $BK_{th}$  — теоретический показатель цвета  $(B - K)$ ,  $BR_{exp}$  — колор-индекс  $(B - R)$ .

И находим разницу  $CE$  (color excess) между экспериментальным (посчитанным по пикселям) и теоретическим (по формуле выше) показателями цвета  $(B - K)$ .

Теперь необходимо домножить полученное значение на некоторый коэффициент, который выведен путём логических размышлений на основе теории о различной степени поглощения лучей различных длин волн, и оказывается равным  $\gamma$ :

$$\Delta m = \gamma \times CE.$$

Как результат работы метода подсчитаем на произвольном примере, какова была бы погрешность в определении расстояния, применяя формулы (1) и (3). Зададимся произвольными значениями  $m=3$ ,  $M=5$ , и пусть по результатам применяемого метода мы получили значение  $\Delta m=2$ , что характерно для тёмных туманностей. Тогда, если не учитывать межзвёздное поглощение, мы получаем расстояние до звезды за туманностью, равное 3,98 парсек, а если учесть фактор погрешности, то расстояние оказывается равным в 1,58 парсек. То есть расстояние без учета межзвёздного поглощения окажется завышенным почти в 2,5 раза.

### Список литературы

1. Бакулин П.И. Кононович Э.В. Мороз В.И. Курс общей астрономии. Издание четвертое, исправленное и дополненное, Москва, 1977 — 544 с.
2. Каплан С.А., Пикельнер С.Б. Межзвёздная среда, Москва, 1963 — 532 с.
3. Аллер Л. Атомы, звёзды и туманности, Москва, 1976, 352 с.
4. Страйжис В. Л. Многоцветная фотометрия звёзд, Вильнюс — 312 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА НА РАЗВИТИЕ ЛИСТОВОГО САЛАТА В СТАДИИ ПРОРАЩИВАНИЯ

А.А. ГУБИНА, М.М. РОМАНОВИЧ, Е. ЛЕВИН, И.А. ЛАМКИН

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Целью работы являлось исследование динамики развития листового салата под действием светодиодного излучения синего (440 нм) и красного (660 нм) диапазонов видимого спектра. Для исследования были выбраны различные соотношения выбранных спектров, а также суммарные значения плотности фотосинтетического фотонного потока ( $100 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $300 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ). Показано, что максимальная всхожесть листового салата достигается при воздействии  $100 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  50 % красного и 50 % синего диапазонов спектра, максимальная средняя длина корня (23,3 мм) достигается при 75 % красного и 25 % синего света при  $100 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , также в данных боксах была получена и максимальная длина стебля (17,5 мм).

**Ключевые слова:** *светодиод, агрофотоника, фотосинтетически активная радиация, плотность фотосинтетического потока фотонов, эффективность, спектральная характеристика.*

### **Актуальность и цели исследований.**

Известно, что на рост и развитие растений оказывает влияние излучение, длины волн которого попадают в диапазон фотосинтетически активной радиации (ФАР). При этом существующие в растениях пигменты и фоторецепторы, способные реагировать на свет, чувствительны к излучению только определённых длин волн. Доказано [1], что досветка растений с помощью светодиодного излучения позволяет обеспечивать необходимое качество света, способствующее усиленному росту и улучшению показателей развития культур. Таким образом, альтернативные источники излучения для улучшения показателей роста растений представляют большой интерес для сельскохозяйственной области.

Эффективность досветки растений определяется: электрическими характеристиками светодиода (СИД), оптической мощностью излучения и плотностью фотосинтетического фотонного потока (PPFD).

### **Проведение экспериментов.**

Для обеспечения растений PPFD  $100 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  и  $300 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , а также для реализации освещения в соотношениях синего (С) и красного (К) излучения по значению PPFD 75%С+25%К, 50%С+50%К, 25%С+75%К был проведен анализ спектрально-энергетических характеристик СИД 440 нм и 660 нм при различных параметрах питания, расчёт плотности фотосинтетического фотонного потока выбранных источников излучения и спроектирована электрическая схема для исследований. Спектральные характеристики выбранных 3-ваттных светодиодов (рис.1) исследовались согласно методике, описанной в [2].

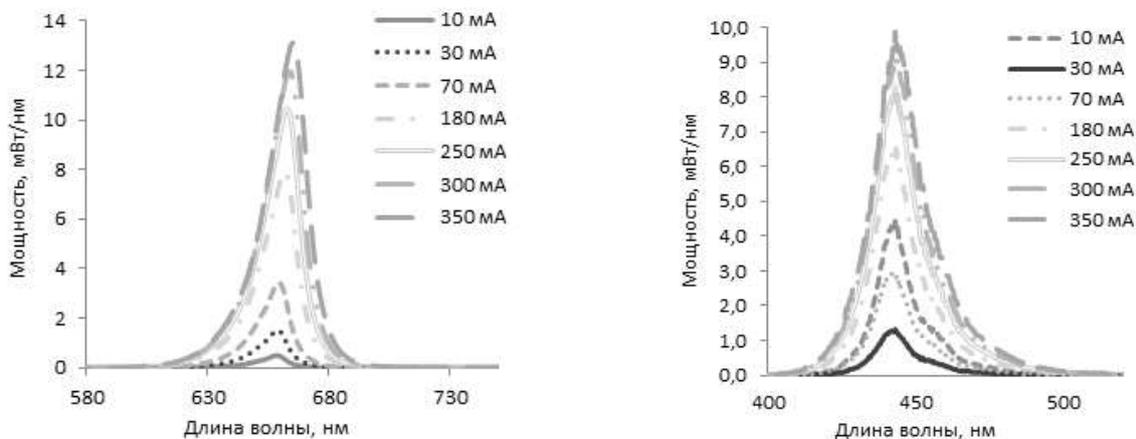


Рис. 1. Спектральные характеристики красного (660 нм) (а) и синего (440 нм) (б) СИД.

Значения плотности фотосинтетического фотонного потока для каждого СИД были вычислены по формуле 1 с помощью полученных спектральных характеристик на разных значениях высоты и приведены на рисунках 2 и 3.

$$F_{\text{ФАР}} = \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} d\lambda = K \cdot \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ФАР}}$  — плотность фотосинтетического потока фотонов,  $\mu\text{кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $S$  — площадь освещенной поверхности;  $\varphi_{\lambda}$  — спектральная плотность распределения мощности излучения прибора (в области ФАР),  $\text{Вт}/\text{нм}$ ;  $\lambda$  — длина волны,  $\text{нм}$ ;  $h = 6,623 \cdot 10^{-34}$   $\text{Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^{17}$   $\text{нм}/\text{с}$  — скорость света;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{17}$   $\mu\text{кмоль}$  — число Авогадро;  $K = 8,36 \cdot 10^{-3}$   $\mu\text{кмоль} \cdot \text{нм} \cdot \text{Дж}$  — коэффициент.

Таким образом, в исследовании проводилось 9 экспериментов. На основе зависимостей PPFД излучателей от расстояния до растений, представленных на рисунках 2 и 3, были определены высота установки и электрические параметры цепи. В электрической схеме применялись стабилизаторы тока LM317.

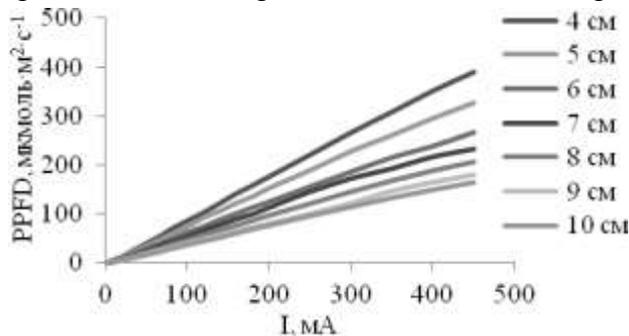


Рис. 2. Зависимость PPFД от расстояния до приемника для красного (660 нм) СИД.

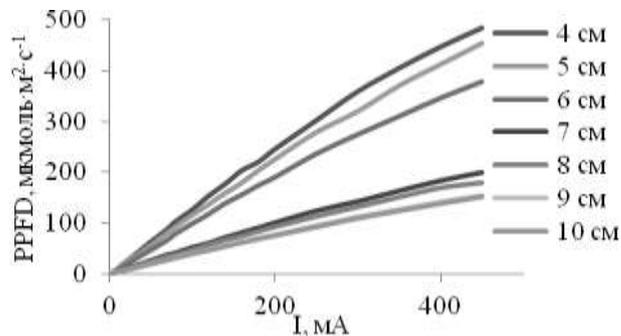


Рис. 3. Зависимость PPFД от расстояния до приемника для синего (440 нм) СИД.

На каждый эксперимент приходилось по 3 бокса. Длительность проведения исследований — 12 дней. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение интенсивности СИД	Номер бокса	Всхожесть, %	Усреднённая длина корня, мм	Усреднённая длина стебля, мм	
75 % красный / 25 % синий (100 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	1	96,6	94,2	24	18
	2	88,8		23	16,6
	3	97,2		23	18
50 % красный / 50 % синий (100 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	4	97,2	95,8	23	16
	5	97,1		22,8	16
	6	93,3		23	14,8
25 % красный / 75 % синий (100 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	7	94,2	93,7	23	16,5
	8	93,3		23,5	16
	9	93,8		23	15
75 % красный / 25 % синий (200 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	10	96,6	93,9	22,8	16
	11	88,2		23	14
	12	96,6		22	14
50 % красный / 50 % синий (200 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	13	96,6	92,1	22,8	14,5
	14	94,1		23,5	14
	15	85,7		23,4	14
25 % красный / 75 % синий (200 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	16	96,6	90,5	22,6	13,5
	17	89,4		22	14
	18	85,7		23,5	13,8
75 % красный / 25 % синий (300 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	19	93,3	87,1	23,2	14,5
	20	88,2		23	14,6
	21	80		23,4	15
50 % красный / 50 % синий (300 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	22	94,7	94,4	22,8	15
	23	91,4		23,4	15,2
	24	97,1		22,5	13,5
25 % красный / 75 % синий (300 мкмоль·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup> )	25	90	92,7	20	14,5
	26	91,2		21	14
	27	97,1		21,2	13,4

Установлено, что максимальная всхожесть семян салата (95,8%) была достигнута в боксах № 4,5,6 (100 мкмоль·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>). В боксах № 22, 23, 24 всхожесть семян достигла 87,1 %, этот показатель является минимальным. В боксах под номерами 1, 2 и 3 средняя длина корня составила 23,3 мм, максимальная длина стебля — 17,5 мм, данные значения являются максимальными для образцов среди всех экспериментов.

#### Заключение

Таким образом, в результате эксперимента было выявлено, что максимальная всхожесть семян достигается при воздействии светодиодного излучения красного (660 нм) и синего (440 нм) спектров в соотношении 50%/50% при суммарном значении плотности фотосинтетического фотонного потока 100 мкмоль·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Наилучшим образом влияет

на вегетативное развитие листового салата комбинированное излучение с 75% красного и 25 % синего спектра ( $100 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ), поскольку происходит воздействие на морфологию растений (размер и форму листьев, длину стебля) в стадии проращивания, происходит открытие устьиц, синтез хлорофилла, его деление и функционирование хлоропластов, а также замедление роста стебля. Цвет листа является показателем качества и визуальной характеристикой развития культур. В листовых овощах содержание хлорофилла связано с зеленью листьев, а накопление антоцианов вызывает их покраснение. При значительном воздействии светодиодного излучения 660 нм наблюдалось наибольшее формирование зеленой массы салата по сравнению с влиянием комбинированного красно-синего освещения, но синтезировалось значительно меньшее количество хлорофилла.

### Список литературы

1. Spalding, E.P., Folta, K.M. Illuminating topics in plant photobiology. *Plant Cell Environ.* 2005; 39–53.
2. М. М. Романович, Н. В. Рошина, А. А. Александрова, С. А. Тарасов, I. A. Lamkin, The Optoelectronic Semiconductor Device Based of the Leds to Improve Plant Growth // Conference: 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020, DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039256

## ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРЕЛЛЫ

М. А. МАЛЫГА, И.А.ПРОСОЛОВ, К. Г.АНТОНЕНКО, В.С.ГОРЯИНОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Одноклеточная водоросль хлорелла играет важную экологическую роль в природных водах и является распространенным объектом лабораторных исследований, в том числе исследований ее оптических свойств. В ходе исследования были проведены съемки спектра флюоресценции образцов хлореллы, при воздействии на них излучением светодиода с длиной волны 460 нм. Получены спектральные характеристики и рассчитан квантовый выход флюоресценции.

**Ключевые слова:** *природные воды, хлорелла, флюоресценция, волоконно-оптический спектрометр.*

### Введение

Хлорофиллы — это пигменты, естественным образом присутствующие во всех растениях, которые поглощают свет. Основными формами хлорофилла в водорослях являются хлорофилл а и хлорофилл б. Одноклеточная водоросль хлорелла (*Chlorella vulgaris*) содержит в своих клетках обе формы хлорофилла.

Хлорофилл поглощает излучение в очень широком спектральном диапазоне от УФ до ИК, причем максимумы поглощения приходятся на синюю и красную область [1]. Часть поглощенной энергии излучается в виде флюоресценции при переходе клеток из возбужденного в основное состояние. Главная полоса флюоресценции расположена вблизи длины волны 685 нм [2, 3].

Хлорелла играет важную экологическую роль в природных водах, так как находится в основании пищевых цепей. Ее широкое распространение также обуславливает ее применение в качестве объекта различных лабораторных исследований.

**Целью данного исследования** является изучение влияния солнечного света на эффективность флуоресценции хлореллы, а также зависимости флуоресценции от концентрации суспензии хлореллы (исследования проводились для образцов с повышенной концентрацией, намного превышающей концентрацию в природных водоемах).

### Лабораторные измерения

Для проведения исследований была разработана и смонтирована лабораторная установка на основе волоконно-оптического спектрометра [4], схема которой показана на рис. 1.

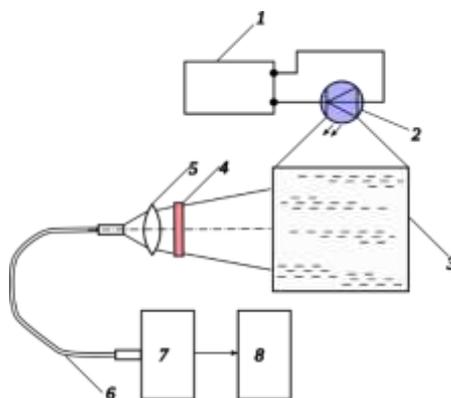


Рис. 1. Схема лабораторной установки.

Свет от диода 2, подключенного к лабораторному источнику питания 1, проходит через кювету с образцом 3, где возбуждает процесс флуоресценции. Излучение флуоресценции хлореллы проходит через прозрачную стенку кюветы, оптический фильтр КС13 (4), фокусирующую линзу 5 и попадает в оптоволоконно-оптический кабель 6, который соединен со спектрометром Ocean Optics 7, подключенным к компьютеру 8.

Поскольку регистрация флуоресценции малой интенсивности требовала большого времени интегрирования спектрометра (5 — 20 с), при измерениях установку накрывали непрозрачной плотной черной тканью, чтобы исключить воздействие света от внешних источников.

Исследовались два образца хлореллы с разными условиями содержания: хранившийся в тени (теневого) и находившийся длительное время под воздействием солнечного света (освещенный). Для обоих образцов были проведены измерения для разных концентраций, это достигалось смешением суспензии хлореллы с дистиллированной водой.

Для расчета квантового выхода была использована формула:

$$\varphi = \frac{S_{\text{фл}}/k_{\text{КС13}}}{S_{\text{диод}}/(k_{\text{ОС6}} * k_{\text{ФС6}})}$$

где  $S_{\text{фл}}$  и  $S_{\text{диод}}$  — это мощности флуоресценции и излучения диода соответственно (площади под графиками спектральных характеристик интенсивности), а  $k_{\text{КС13}}$ ,  $k_{\text{ОС6}}$  и  $k_{\text{ФС6}}$  — это спектральные коэффициенты пропускания фильтров-стекло, использованных при измерениях. Графики зависимости квантового выхода флуоресценции хлореллы от ее концентрации приведены на рис. 2.

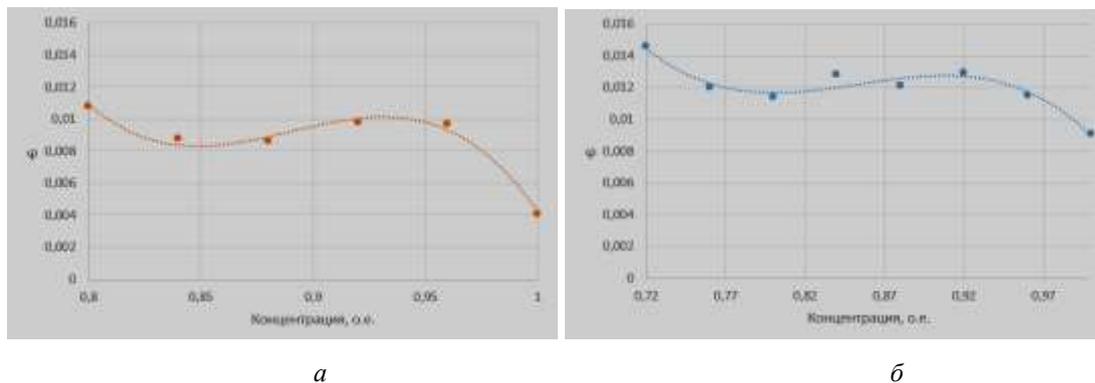


Рис. 2. Зависимость квантового выхода от концентрации хлореллы.  
(а — теневой образец, б — освещенный образец).

### Заключение

Из графиков на рис. 2 видно, что образец, длительное время получавший энергию солнечного света, излучает интенсивнее, чем образец, находившийся в тени. Это может объясняться большим содержанием хлорофилла в клетках хлореллы. Также было замечено, что на максимальных концентрациях наблюдается обратная зависимость квантового выхода от концентрации хлореллы в растворе, что обусловлено слишком большой плотностью клеток хлорофилла и возможным поглощением излучения флуоресценции соседними клетками.

### Список литературы

1. Bricaud, A. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization / A. Bricaud, M. Babin, A. Morel, H. Claustre // *Journal of Geophysical Research*. — 1995. — V. 100. — P. 13321-13332.
2. Babin, M. Phytoplankton fluorescence: Theory, current literature and in situ measurement / M. Babin, C. S. Roesler and J. J. Cullen [eds.] // *Real-time coastal observing systems for ecosystem dynamics and harmful algal blooms*. UNESCO, 2008.
3. Teplicky, T. Fluorescence Properties of *Chlorella* sp. Algae / T. Teplicky, M. Danisova, M. Valica, D. Chorvat, A. Marcek Chorvatova // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. — 2017. — V. 15. — P. 352-357.
4. Горяинов, В. С. Лабораторный измеритель гидрооптических характеристик на основе волоконно-оптического спектрометра / В. С. Горяинов, М. Хасенова, К. Г. Антоненко, А. А. Бузников // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. — 2021. — N. 2. — С. 5-14.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОТЕЗА СТОПЫ НА 3D ПРИНТЕРЕ ДЛЯ БИОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОХОДКИ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОАНАЛИЗА

О.Н. МАЛЬЦЕВА<sup>1</sup>, А.Ю. АКСЕНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** Был смоделирован и распечатан на 3D принтере протез стопы для пациента с ампутацией верхней трети левой голени. Был разработан сравнительный анализ биомеханики ходьбы для функциональной оценки распечатанных протезов. Была разработана маркерная

модель построения скелета человека в протезе нижних конечностей, написан математический алгоритм обработки кинематических и кинетических данных.

**Ключевые слова:** протез стопы, аддитивные технологии печати, биомеханика ходьбы.

### **Введение**

На сегодняшний день в России проживает более миллиона людей с ампутациями нижних и верхних конечностей. Ежегодно на 1 миллион жителей выполняется около 500 операций по ампутации нижних конечностей. В большинстве случаев протезы стоп изготавливаются на зарубежных производствах, стоят порядка 200 тысяч рублей и их необходимо менять раз в год-два. На рынке уже доступны технологии для 3D-печати, которые в значительной степени могут удешевить изготовление протеза более чем в 10 раз.

### **Актуальность работы**

Данное исследование может помочь пациентам с ампутациями нижних конечностей улучшить мобильность за счет ускоренного и более дешевого варианта печати протеза стопы, оценить конструкцию и материалы разрабатываемого протеза и в ближайшем будущем может войти в оборот производства носимых протезов.

### **Основная часть**

В данной работе разрабатывается и сравнивается индивидуально смоделированный протез стопы с немецким аналогом марки «Ottobock» 1C30 Trias и Aqua 1WR95. Данная работа актуальна, так как подобное исследование может помочь пациенту с частичной патологией нижней конечности передвигаться. Также, с помощью технологий 3D-печати возможно производить протезы в несколько раз дешевле зарубежных аналогов, тем самым, большее количество людей с ампутациями смогут приобретать устройства российского производства.

В исследовании участвует пациент с ампутацией верхней трети левой голени и частичным отсутствием сухожилия на подошве правой стопы, вес — 79 кг, размер ноги — 26 см. Пациент одновременно является и заказчиком от компании «INSTEP».

В пакете прикладных программ Fusion 360 был смоделирован протез стопы. Геометрия создавалась из учета строения стопы, а именно — сводчатой конструкции и способа работы рессорного свода.



*Рис. 1. Геометрия протеза.*

В конечно-элементном пакете Ansys были созданы граничные условия для моделирования напряженно — деформированного состояния будущего протеза и получены значения перемещений и напряжений, возникающих при заданной нагрузке.

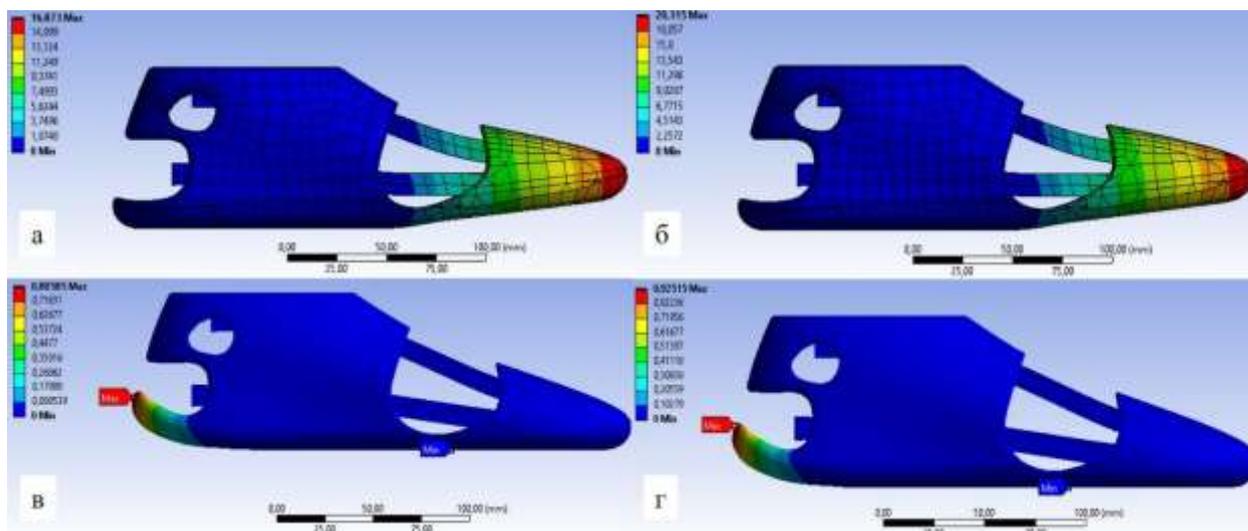


Рис. 2. а) Нагрузка — 800 Н на носок, полученные перемещения, мм. б) Нагрузка — 1000 Н на носок, полученные перемещения, мм. в) Нагрузка — 800 Н на пятку, полученные перемещения, мм. г) Нагрузка — 1000 Н на пятку, полученные перемещения, мм.

Таблица 1

**Сравнение перемещений и напряжений, возникающих в протезе**

Состояние	Носок, нагрузка 800Н	Носок, нагрузка 1000Н	Пятка, нагрузка 800Н	Пятка, нагрузка 1000Н
Макс. перемещение, мм	16,9	20,3	0,8	0,9
Макс. напряжения, МПа	19,6	23,5	8,3	9,7

На втором этапе исследования производилась печать изделия из подобранных материалов — Petg — пластик и Rubber Res — резина. Данный пластик отличается хорошим склеиванием слоев при печати, в отличие от ему подобных — Abs и Sl. Резина отличается гибкостью, за счет параметров материала. С полной заполняемостью при печати может выдерживать нагрузки >80 кг, при этом оставаясь упругой.



Рис. 3. Распечатанная модель.

На следующем этапе проводилось тестирование изделия пациентом, который давал собственную оценку эстетичности и удобства использования в таких ситуациях как ходьба по ровной поверхности и ходьба по лестнице. По оценке пациента, смоделированный протез стопы выдерживает вес, в нем удобно ходить и, за счет

упругости направляющей, изделие помогает сделать человеку с ампутацией сделать следующий шаг, что является одним из главных критериев, так как мышцы бедра не перенапрягаются при переносе ноги.

Заключительной частью исследования является оценка кинематических и кинетических параметров с помощью видеоанализа в лаборатории захвата и моделирования движения. С помощью восьми оптических инфракрасных камер Miquis M5 с частотой регистрации 183 Гц и динамометрических платформ Kistler с частотой регистрации 1000 Гц производился сравнительный анализ пространственно-временных параметров ходьбы, кинематических и кинетических данных в программной среде Visual3D (C-motion) и QTM (Qualisys). Рассчитывался индекс ходьбы (GPS), где используется нормативная база кинематических параметров суставов нижних конечностей компании Qualisys. Чем выше значения общего индекса, тем выше степень патологии ходьбы, при этом значения индекса ниже 8,5 считаются нормой. Проведенный анализ показал, что разработанный протез стопы продемонстрировал хорошие показатели при использовании пациентом с ампутацией верхней трети голени, где индекс не превышал значений 8,5 (рис. 4). По рисунку 4 также можно отметить, что индекс ходьбы ноги с протезом лучше, чем на здоровой ноге.

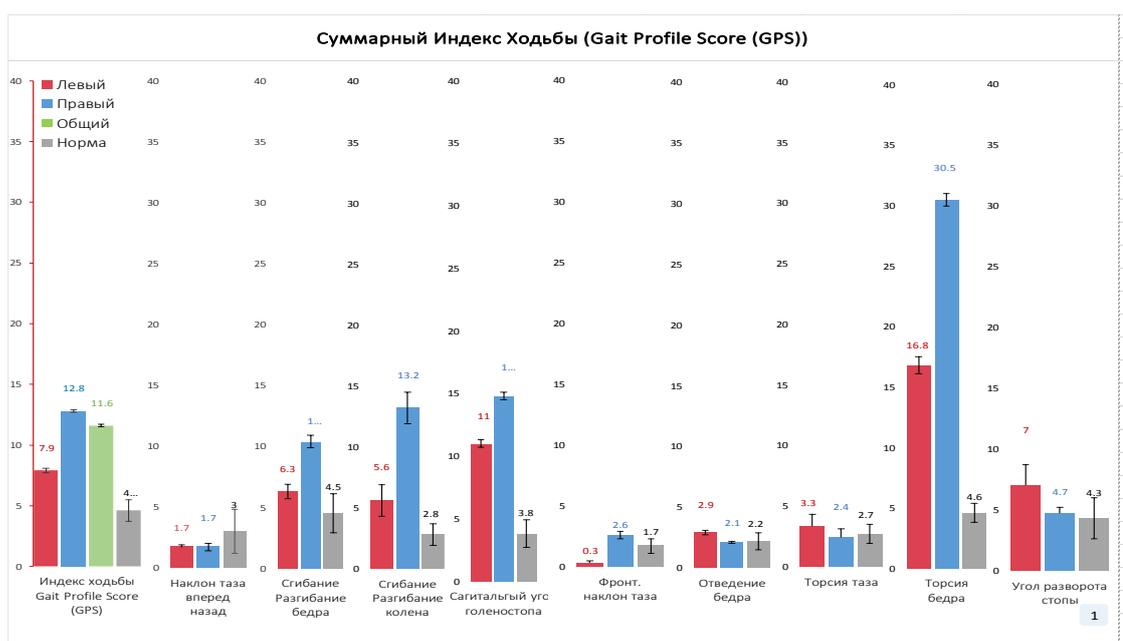


Рис. 4. Результаты исследования.

Однако вертикальная составляющая силы реакции опоры в момент вхождения протеза стопы в опору показал резкий скачок за короткий промежуток времени и похожие показатели были получены у протеза «Ottobock» 1C30 Trias (рис. 5).

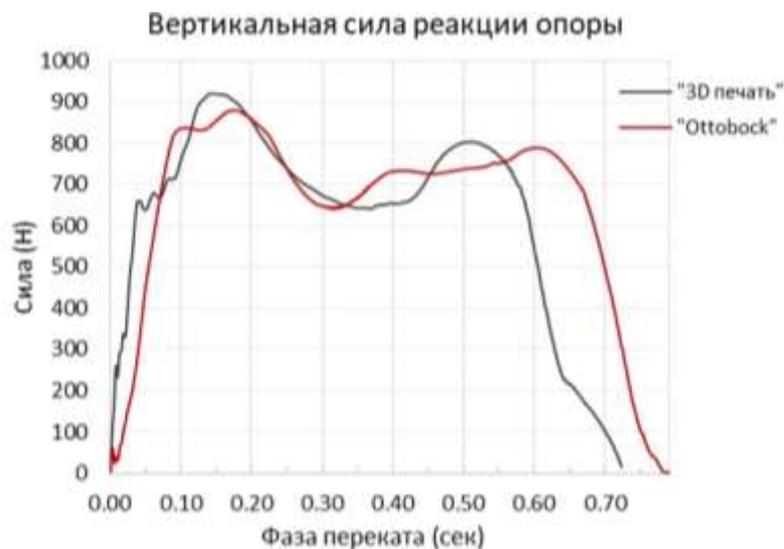


Рис. 5. Вертикальная сила реакции опоры.

Следующим этапом будет доработка протеза стопы для улучшения амортизации за счет материалов и конструкции пятки, что в значительной степени может уменьшить нагрузку тканей и суставов в момент вхождения стопы в опору, что уменьшит вероятность возникновения травм и повысит комфорт при использовании данного устройства.

### Заключение

В ходе выполнения работы были получены качественные и количественные подтверждения того, что протез, распечатанный на 3D принтере, не уступает по качеству и функциональности зарубежным аналогам, стоимостью на порядок выше изготовленной модели. Кроме того, изготовление протеза с помощью аддитивных технологий занимает 1-2 дня, что несравнимо со временем изготовления и доставкой протезов из-за рубежа (5 — 12 недель). Таким образом, следующим этапом исследованиями ходьбы пациента является эксплуатация изделия сроком неделя/месяц/полгода для выявления усталостных нагрузок, приводящих к поломке изделия, и оптимизация геометрии модели.

### Список литературы

1. Клинический анализ движений. Анализ походки: Издательство НПЦ — «Стимул», Иваново, 1996. — 344 с.: ил. Библ. — 329 назв. ISBN 5-86139- 066-5
2. Ventura, J.D., Klute, G.K., Neptune, R.R. The effect of prosthetic ankle energy storage and return properties on muscle activity in below-knee amputee walking. *Gait Posture* 33. 2011. 220–226.

# РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КАРБОНОВЫХ ЭМИССИЙ ОТ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ

ХАСАНОВ А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Приводится методика и алгоритмическое обеспечение информационной системы, способное на основе массива исходных данных синтезировать информацию о состоянии окружающей среды путем мониторинга уровней концентрации загрязняющих веществ в ней. Полученная модель также позволяет производить прогнозирование состояния прилегающей территории в зависимости от возможных ситуаций, связанных с изменением первоначальных параметров, описывающих источник загрязнения. На основе полученных данных производится анализ воздействия распределения загрязняющих веществ на прилегающую территорию путем описания их распространения в течение времени.

*Ключевые слова:* информационная система, моделирование, карбоновые эмиссии, мониторинг загрязнений

## **1. Объект и методы моделирования.**

В представленной работе исследованию подлежит изменение величины концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) на прилегающей к точечному источнику загрязнений (ТИЗ) территории с течением времени. Для осуществления данного анализа на основе ограниченного спектра исходных данных требуется разработать модель. Информационная система, построенная на основе данной модели должна предоставлять дополнительные новые данные, на основе которых будет производиться анализ.

В целях удовлетворения требований необходимо разработать алгоритмическое обеспечение, способное на основе исходного набора данных предоставить полный перечень исследуемой выходной информации. К заданному набору исходных данных относятся следующие:

Параметры ЗВ, характеризующих их физические и химические свойства.

Параметры ТИЗ, который распространяет ЗВ — его конструктивные характеристики. Мощность выбросов, позволяющая оценить скорость и объемы выбрасываемых веществ.

Параметры территории, на которой происходит моделирование распределения концентраций — от них зависит каким образом ЗВ распространяется в пространстве, размер анализируемой прилегающей к ТИЗ территории.

Метеорологические параметры, которые напрямую влияют на характер распространения ЗВ, выбрасываемых из ТИЗ на рассматриваемом участке прилегающей территории.

Описываемая модель приобретает адекватные характеристики достоверности, позволяющие с её помощью описывать поведение реального объекта в виде выбросов ЗВ на прилегающей территории с помощью объекта динамической модели. Формирование параметров данной модели описывается на блок-схеме, приведённой на рис 1.

В ней приводится качественное описание методики обработки входных априорных данных до детерминированной модели с вычисленными характеристиками.

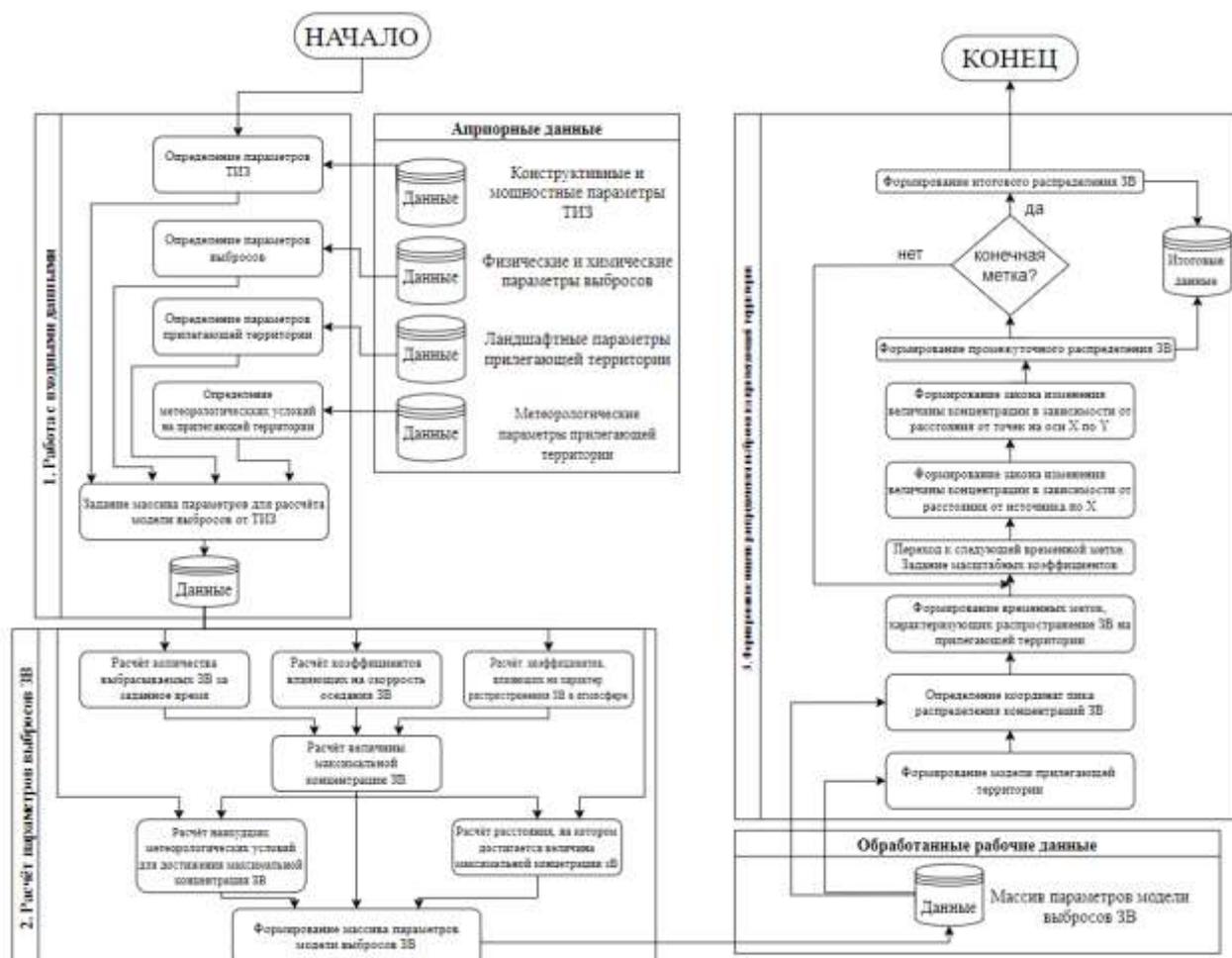


Рис 1. Описание алгоритма формирования динамической модели распределения концентраций ЗВ.

Методика формирования динамической модели распространения ЗВ на прилегающей к ТИЗ территории заключается в расчёте концентраций карбоновых эмиссий на каждой точке в пространстве, в зависимости от расстояния от ТИЗ. Такое распределение обеспечивается с помощью математического аппарата, основанного на Методике расчётов рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе от 06.06.2017 [1].

На основе рассматриваемой методики производится расчёт величины концентраций выбросов карбоновых эмиссий в соответствии с блок-схемой на рис. 1 и алгоритму. Согласно ему, набор входных данных используется для расчёта коэффициентов, учитывающих следующие параметры, влияющие на распространение ЗВ по территории, такие как: Скорость, с которой источник выбрасывает в атмосферу ЗВ; Объем вещества, который может быть выброшен в атмосферу за однократную итерацию; Коэффициент, определяющий температурную неравномерность атмосферы, в которой происходит распространение; Коэффициент, определяющий насколько быстро ЗВ будет оседать на поверхности земли; Коэффициент, определяющий влияние рельефа прилегающей территории. По полученным коэффициентам и согласно алгоритму, описанному в рис. 1 производится формирование набора композиций на прилегающей территории, которые распределены во времени с учётом масштабных коэффициентов — которые и позволяют произвести требуемый динамический характер нарастания и распределения карбоновых эмиссий по прилегающей территории к ТИЗ.

## 2. Реализация информационной системы.

На основе рассмотренного алгоритмического обеспечения, позволяющего получить динамическое распространение ЗВ на прилегающей к ТИЗ территории можно разработать систему, способную принимать входные априорные данные и показывать результат в виде воздействия композиции концентраций ЗВ на территорию вокруг ТИЗ. Для того чтобы осуществить достижение поставленных целей может быть использован математический программный пакет matlab/simulink, с помощью которого осуществляется визуализация итоговой композиции концентраций ЗВ на прилегающей территории. Рассмотрим, каким образом может быть осуществлена данная реализация.

Первостепенно, требуется реализовать ядро информационной системы в виде расчётного модуля, который способен реализовывать описанную динамическую модель. Согласно используемой методике динамическая модель конструируется и рассчитывается с допущениями, что выбросы распространяются по территории в условные временные промежутки, определенным образом разделенные между собой. Тогда структурная схема такой программной реализации будет иметь вид как на рис. 2.

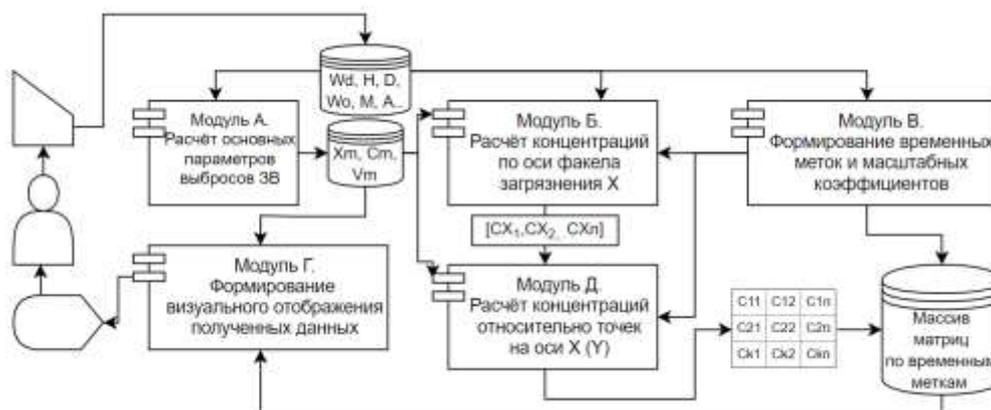


Рис 2. Программная реализация расчётов динамической модели.

По рисунку 2 легко видеть, что входные параметры, которые задаются непосредственно пользователем (будь то вручную или предварительно) представляют собой набор исходных параметров, описанных в пункте 1, среди которых конструктивные, физические, химические и метеорологические — на основе этих данных отдельные модули программ, связанные друг с другом, по заданным формулам [2] производят вычисления для получения на выходе трёхмерного массива данных. Опишем работу информационной системы.

Модуль А — «Расчёт основных параметров выбросов» — является фронтальным модулем информационной системы. Он позволяет на основе меняющихся входных данных определять характер выходной композиции концентраций ЗВ. В нём производится расчёт основополагающих элементов распределения, таких как  $C_m$  — максимальная концентрация ЗВ,  $X_m$  — расстояние от ТИЗ, на котором достигается концентрация  $C_m$ , а также величина скорости опасной скорости ветра, при котором достигается величина  $C_m$ . На основе этих параметров в модулях Б и Д производится расчёт двумерных массивов концентраций, каждый из которых представляет собой композицию в определенный условный момент времени, благодаря чему обеспечивается описание динамического распространения ЗВ по прилегающей территории. Обеспечение динамичности,

закрывающейся в постепенном распространении и изменении величин концентраций обеспечивается с помощью временных меток и масштабных коэффициентов — за всё это отвечает модуль В.

Благодаря ему итоговые данные на выходе модели обеспечивают функциональность информационной системы путём формирования динамичности. Произведя все расчёты, трёхмерный массив данных отправляется в модуль Г, где обеспечивается функциональность, связанная с мониторингом окружающей ТИЗ среды в виде наглядных рисунков и графиков (рис 3.)

### 3. Результаты проектирования информационной системы и их анализ.

Была выполнена прямая задача математического моделирования [3], на основе результатов которого построена информационная система. Рассмотрим её работу на рисунке 3, на котором приведён пример макета интерфейса информационной системы.

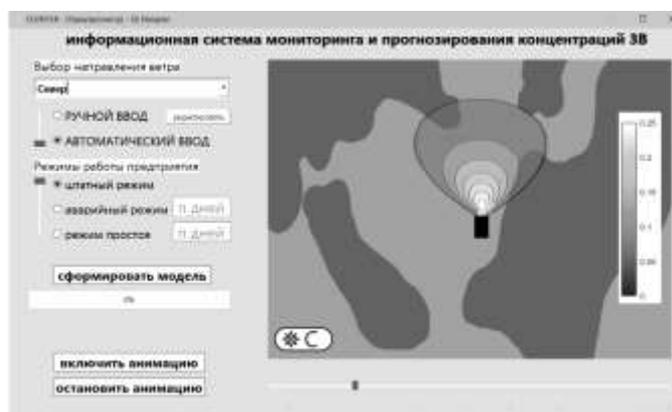


Рис 3. Вид интерфейса информационной системы.

Разработанная информационная система позволяет пользователю задать собственные исходные данные, на основе которых будет осуществляться расчёт. Однако для демонстрационных целей возможно использовать стандартную модель. С помощью элементов управления в интерфейсе осуществляется мониторинг состояния прилегающей к ТИЗ территории в различные моменты времени, регулируемые ползунком ниже модели.

Благодаря разработанной функциональности информационной системы возможно осуществление прогнозирования вида композиции концентраций ЗВ на прилегающей территории в зависимости от направления ветра, режима работы ТИЗ, а также смены исходных данных. Анализ полученных результатов предоставляет возможность для приблизительной оценки вклада ЗВ от ТИЗ на экологическое состояние прилегающей территории. Подобные данные востребованы в рамках актуальных проблем, связанных с сокращением парниковых выбросов и могут быть использованы для проектирования предприятий и их расположения для минимизации вклада в карбоновые эмиссии путём осуществления балансировки между выбросами и поглощением ЗВ. [4,5]

### Список литературы

1. Методы расчёта выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, МРР-20172.
2. Методические рекомендации по проведению инвентаризации выбросов парниковых газов от 16.04.2015.
3. A. M. Khassanov and E. S. Suloeva, «The Modeling of Carbon Emissions from a Point Source», 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022, pp. 1534-1537, doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755712.

4. Федосов А.А. Моделирование распространения выбросов вредных веществ в пограничном слое атмосферы.
5. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975.

## **РАЗРАБОТКА СВЕТОДИОДНОГО ФИТОИЗЛУЧАТЕЛЯ С АДАПТИВНЫМ К ЦВЕТОВОМУ ВОСПРИЯТИЮ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ**

А.Д. ШАРНИН, М.М. РОМАНОВИЧ, И.А. ЛАМКИН

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Проведено исследование характеристик светодиодов (СИД) на основе GaAsP (730 нм), AlGaInP (660 нм), InGaN (530, 445 и 370 нм). Экспериментально получены спектральные характеристики СИД и для каждого из них вычислены значения плотности фотосинтетического потока. На основе исследованных данных спроектирована фитолампа, включающая набор вышеописанных СИД с функцией адаптации цветового излучения к комфортному восприятию человеческим глазом.

*Ключевые слова:* светодиод, фитоизлучатель, фотосинтетически активная радиация, плотность фотосинтетического потока фотонов, эффективность, спектральная характеристика,

### **Актуальность и цель исследований.**

В настоящее время стремление агропромышленных секторов к стабильному, высокоэффективному и стандартизированному производству продуктов питания становится все более актуальным. Светодиодное освещение и светоизлучающие диоды, в частности, завоевывают все большую долю рынка и получают все более широкий профиль применения. Благодаря этому появился способ обеспечивать эффективное искусственное освещение как на открытых территориях, так и внутри помещений. Для обеспечения активного роста растений требуется согласование излучения СИД со спектрами поглощения пигментов растений. Для решения этой проблемы была разработана фитолампа — прибор, который предназначен для создания искусственного освещения сельскохозяйственных культур, способный обеспечивать светом растения в требуемых областях спектра. Основное преимущество применения светодиодных ламп для освещения фитоценоза — возможность реализации идеального для их роста спектра излучения.

Многие исследования доказывают, что излучение, длины волн которого попадают в диапазон фотосинтетически активной радиации (ФАР), положительно влияет на рост и развитие растений. В исследовании [1], целью которого являлось формирование оптимальной среды для тепличных светокультур, приводятся экспериментальные данные влияния отдельных диапазонов спектра излучения светодиодов. Так при использовании УФ излучения («ультрафиолет А» 380 — 430 нм), растения производят антиоксидантные соединения (флавоноиды и фенольные соединения), отвечающие за окрашивание фруктов и овощей в фиолетовый, красный и синий цвета. Также данный тип излучения увеличивает механическую прочность листьев и формирует устойчивость к грибкам.

Синий диапазон спектра (430 — 450 нм) хорошо поглощается большинством пигментов светокультур, влияя на морфологию растения: размер и форму листьев, длину

стебля. Наибольшая эффективность данного излучения наблюдается во время вегетативной фазы, способствуя открытию устьиц и увеличению жизненно необходимых микроэлементов и белков. Красный свет (610 — 720 нм) поглощается на всех этапах развития растения, способствуя цветению, прорастанию почек, росту стеблевых листьев, их опаданию и спячке почек.

Дальний красный и ближний инфракрасный диапазоны (720 — 1000 нм) практически не поглощаются растениями, однако только данный диапазон способен выполнять «сигнальную функцию», влияя на время наступления и длительность фазы цветения и плодоношения. Вышеперечисленные типы излучения генерируются светоизлучающими диодами (СИД) на основе твердых растворов GaAsP, AlGaInP, InGaN.

Физические и химические свойства материалов активной области светодиода оказывают влияние на спектральную характеристику и фотосинтетический поток фотонов — РРФ, определяющих эффективность облучения растений.

Коммерческие фитолампы в большинстве случаев не включают в свой состав СИД зеленого диапазона, так как в зеленой области спектра (550 — 600 нм) чувствительность растения к данному виду излучению резко снижается [2]. Эта особенность приводит к тому, что цвет излучения фитоизлучателей формируется из красной и синей областей спектра. Работа в таком цветовом излучении мешает контрастности объектов, снижая продуктивность, а также негативно сказывается на зрении человека, приводя к различным офтальмологическим осложнениям.

Целью работы являлось исследование спектральных и энергетических характеристик, описанных выше светодиодов, проектирование и сборка фитоизлучателя с функцией адаптации излучения для комфортной работы человека.

### **Проведение экспериментов.**

В качестве комплектующих фитоизлучателя были выбраны дальние красные (ДК) СИД мощностью 3 Вт с длиной волны 730 нм, красные (К) СИД — 660 нм, зеленые (З) СИД — 530 нм, синие (С) СИД — 445 нм и ультрафиолетовые (УФ) СИД — 370 нм. Согласно методике, описанной в источнике [3], исследовались спектральные характеристики светодиодов. Рабочий режим, используемых СИД, достигается при 300 мА. Дальнейшее увеличение тока способствует повышению мощности излучения, однако при данном режиме резко увеличивается нагрев светодиодов, приводя к деградации активной области. Также были рассчитаны и построены зависимости средних величин эффективности от тока, ВАХ и ВтАХ. Полученные результаты отображены на рисунках 1 — 4.

Из зависимости эффективности СИД можно выделить, что наибольшую эффективность излучения имеют СИД красного и синего диапазонов, а зеленый и ультрафиолетовый светодиоды не могут быть выбраны в качестве основных излучателей. Увеличение тока влечет за собой нагрев и деградацию активной области, что объясняет понижение эффективности. Наличие данных особенностей вызвано различной природой активных областей СИД. По ВАХ были определены рабочие напряжения каждого СИД. Полученные данные несут огромную важность при проектировании схемы фитоизлучателя.

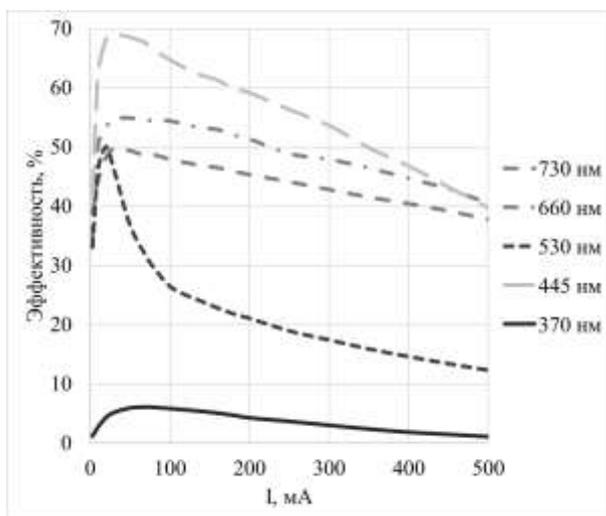


Рис. 1. Зависимости эффективности СИД от тока.

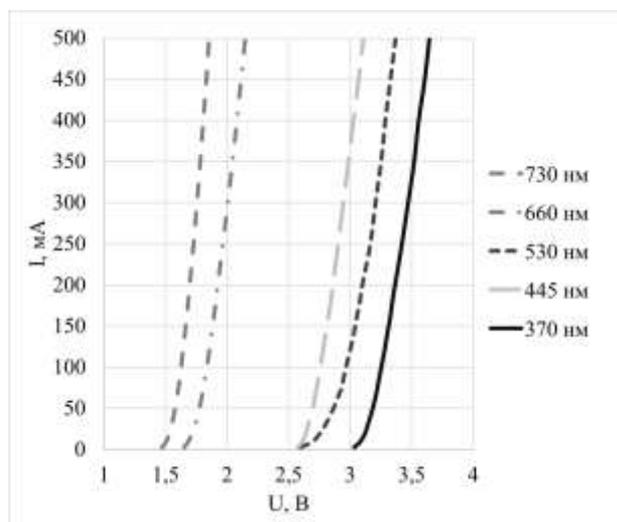


Рис. 2. ВАХ СИД.

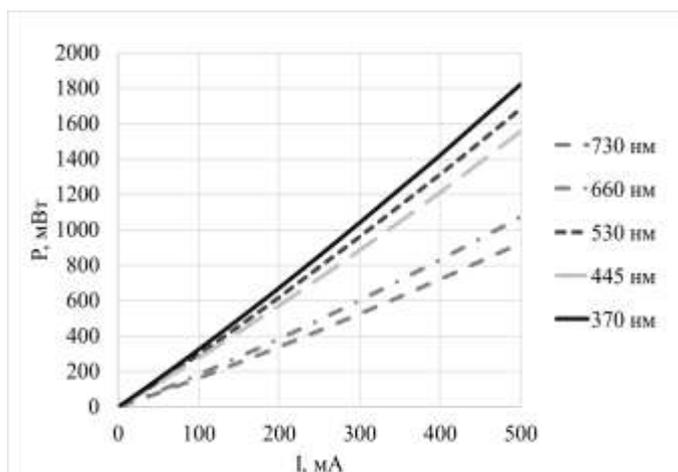


Рис. 3. ВтАХ СИД.

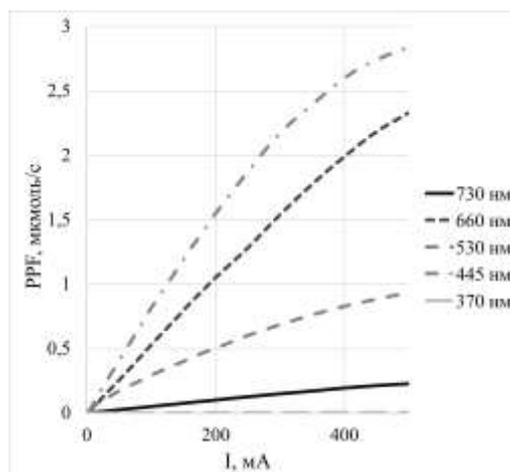


Рис. 4. Зависимости фотосинтетического потока фотонов.

Для определения количества излучаемого света было исследован фотосинтетический поток фотонов (PPF). Полученные результаты представлены на рис. 4. Из исследуемых зависимостей видно, что в формируемом потоке излучения ключевыми составляющими являются светодиоды красного, зеленого и синего цветов. Поэтому, для формирования излучения с равным составом, необходимо правильно учитывать количество СИД.

Исходя из полученных характеристик выбранный рабочий ток, в проектируемом фитоизлучателе, составляет 320 мА. Данный режим обуславливается высокими показателями излучаемой мощности и относительно низким нагревом светодиодов, благодаря чему увеличивается срок службы прибора.

Разрабатываемый фитоизлучатель состоит из 5 линеек по 9 штук светодиодов каждого вида: ДК (730 нм), К (660 нм), З (530 нм), С (445 нм), УФ (370 нм). Прибор имеет кнопку включения/выключения, инфракрасный датчик движения и отверстие для вывода

проводов питания. Трехмерное изображение данного прибора проиллюстрировано на рисунке 5.

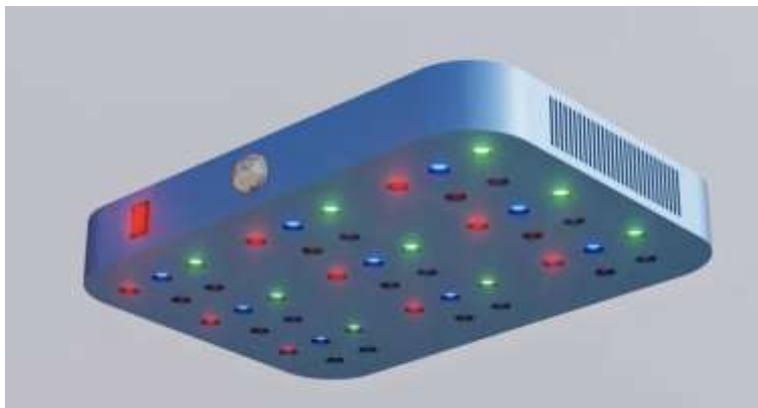


Рис. 5. Трехмерная модель фитоизлучателя.

При включении лампы загораются все светодиоды, кроме зеленых, так как последние работают только при детектировании движения. Совокупность всех цветов излучения СИД позволяет получить освещение белого цвета, комфортное для глаз человека.

Принципиальная электрическая схема прибора изображена на рисунке 6.

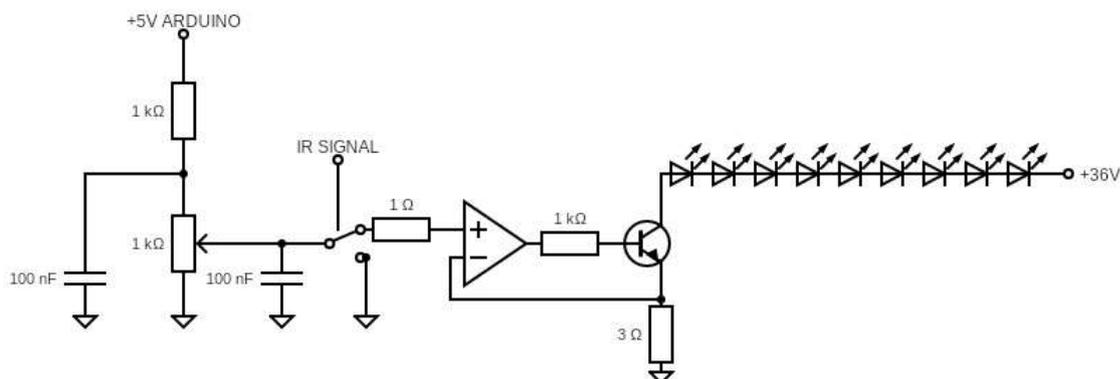


Рис. 6. Электрическая схема.

В ней при помощи референсной точки, представляющей потенциометр и связку конденсаторов, задается напряжение, достаточное для открытия n-p-n-транзистора (примерно 0,7 В). При детектировании движения сигнал от ИК датчика поступает на аналоговый ключ, замыкая оставшуюся часть схемы. На резисторе номиналом 3 Ом задается напряжение, равное напряжению референсной точки, тем самым открывая транзистор. Благодаря этому, от контакта источника питания (36 В) пойдет ток, примерно равный 320 мА. В программном коде Ардуино можно выставить таймер любой длины, по истечении времени которого аналоговый ключ замыкается на землю, и ток через светодиоды протекать прекращается. Выше была описана работа линейки зеленых светодиодов. В случае остальных видов, электрическая схема идентичная, за исключением управляющего сигнала. Его место занимает сигнал с кнопки общего включения/выключения.

### **Заключение**

В результате работы был разработан прибор, адаптивный к цветовому восприятию человеческого глаза спектром излучения, позволяющий проводить исследования влияния излучения различного спектрального состава на рост и качество различных сельскохозяйственных культур.

### **Список литературы**

1. Ермилов А.Н. / Фитолампа с настраиваемым спектром излучения // Безопасность в электроэнергетике и электротехнике. Всероссийская студенческая научная конференция. Ижевск, 2021 г., с. 32-38.
2. Дудина П.С., Ставицкий А.В. / Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения // Сборник материалов LI Международной студенческой научно-практической конференции. Государственный аграрный университет Северного Зауралья (Тюмень), 2017 г., с. 54 — 57.
3. Gubina Anastasiya A., Romanovich Mariya M., Degterev Aleksandr E., Lamkin Ivan A., Tarasov Sergey A. / Development of Phytolamp and Study the Influence of LED Radiation on Tomatoes Growth // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021 г., DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396515.

## **СЕКЦИЯ БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ МИКРОФЛЮИДНОЙ ПОДСИСТЕМЫ СМЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ**

М. В. БОГДАНОВА, Н. О. СИТКОВ, Т. М. ЗИМИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Исследуются функциональные особенности многоканальной гибридной микрофлюидной подсистемы смешения для реализации параллельного оптического тестирования микробиологических образцов в гибридной лаборатории-на-чипе. Оптическая регистрация направлена на оценку жизнеспособности бактерий при воздействии антибиотиков с применением техники спекл-анализа. Система содержит двадцать ячеек для анализа действия десяти антибиотиков на два вида бактерий.

*Ключевые слова:* лаборатория-на-чипе, микрофлюидная аналитическая система, антибиотико-резистентность, пленочный фоторезист.

Лаборатория-на-чипе (ЛНЧ) представляет собой миниатюрное гибридное устройство, предназначенное для различных многостадийных процессов химического, биохимического или микробиологического анализа, использующее микро- и нано-объемы образцов для проведения пробоподготовки и измерений. Эти устройства обычно изготавливаются с помощью технологий микросистемной техники, планарной и гибридной технологий микроэлектроники и принципов миниатюризации [1].

ЛНЧ содержат интегрированные структурные и функциональные элементы анализа, важнейшими из которых являются коммутирующие транспортные каналы переноса вещества (жидкости или газа), называемые микрофлюидной системой. ЛНЧ обеспечивают возможность осуществлять последовательные химические превращения исходных веществ, включая стадии разделения, смешивания, концентрирования продуктов, перемещения их в различные микрокамеры и считывания итоговых результатов. Микро- и нанотехнологии обеспечивают прецизионное формообразование, автоматическое

регулирование стадий аналитического процесса, а также позволяют создавать топологии и конструкции систем для осуществления анализа, включая возможность проведения параллельного анализа нескольких образцов в многоканальных системах.

Микроаналитические системы в настоящее время применяются в медицине и фармакологии, при контроле технологических процессов, для проверки токсичности веществ и действия их на живые ткани, при изучении живых организмов и сред их обитания и т.д. Преимущества ЛНЧ перед аналогами большего размера заключаются в сокращении финансовых затрат на проведение аналитико-диагностических процедур, повышении разрешения и скорости анализа, снижении материало- и энергоемкости оборудования, увеличении портативности устройств и удобства их применения, а также увеличении скорости постановки диагноза, что дает возможность быстро приступить к лечению пациента [2].

Инфекционные болезни продолжают оставаться одной из основных причин нетрудоспособности, инвалидизации и смертности населения. Поэтому создание ЛНЧ для изучения свойств патогенных микроорганизмов, например, их антибиотикорезистентности (АБР), является актуальной научно-технической задачей. Такой анализ возможен в многоканальной микрофлюидной системе, обеспечивающей доставку и точное смешивание в измерительной ячейке раствора антибиотика и суспензии микроорганизмов и отслеживание во времени их жизнеспособности.

Тестирование АБР микроорганизмов может проводиться методом дисков Баера-Кирби. Однако этот метод является трудоемким и длительным. Поэтому среди задач разработки подсистемы для ЛНЧ по анализу жизнеспособности на чипе стоят необходимость ускорения, с одной стороны, и обретение портативности, с другой стороны. При этом для того, чтобы ЛНЧ стали заменой специальному медицинскому лабораторному оборудованию, они должны состоять из недорогих биоразлагаемых одноразовых блоков и отличаться легкостью в использовании. Кроме того ЛНЧ, благодаря эффектам масштабирования, таким как, например, увеличение влияния адгезии, капиллярных эффектов и др., могут обеспечивать повышение скорости функционирования без дополнительных затрат интенсивных факторов — энергии или вещества [3].

Топология микрофлюидной подсистемы для смешения компонентов, представленная на рисунке 1, имеет достаточно сложную организацию, поскольку должна обеспечивать равное время доставки для всех компонентов многоканальной системы. При этом пересечение каналов минимизировано для того, чтобы облегчить визуальное наблюдение и повысить надежность системы. В подсистеме должна решаться задача эффективного смешения образцов и обеспечения их гомогенности.

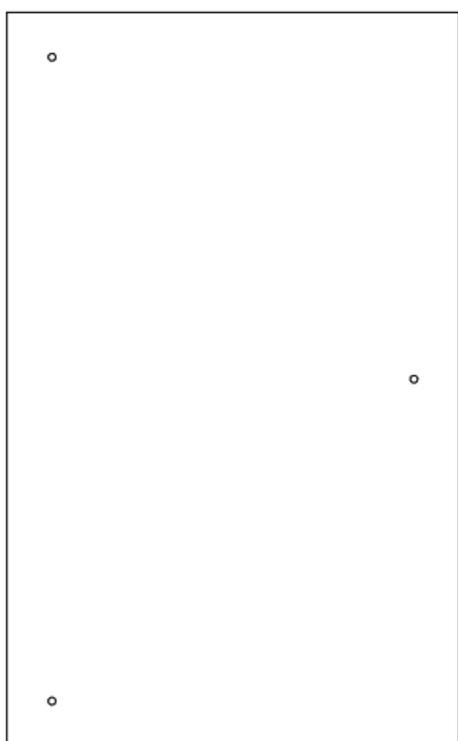
Экспресс-тестирование чувствительности к антибиотикам может быть основано на оптических, импедиметрических или других сенсорных принципах наблюдения за жизнеспособностью микроорганизмов при воздействии антибиотиков [4]. Эффективным методом определения антибиотикорезистентности в ЛНЧ является метод динамической микротурбидиметрии. Выступая в виде дисперсионной фазы, взвешенной в антибиотике, бактерии будут рассеивать направленное когерентное излучение. Регистрируя флуктуации спеклов рассеянного излучения и изменение их динамики можно судить о жизнеспособности бактерий [2].

Как сказано выше, результат работы ЛНЧ сильно зависит от степени гомогенности раствора антибиотика и суспензии микроорганизмов. Но, поскольку в микрофлюидных

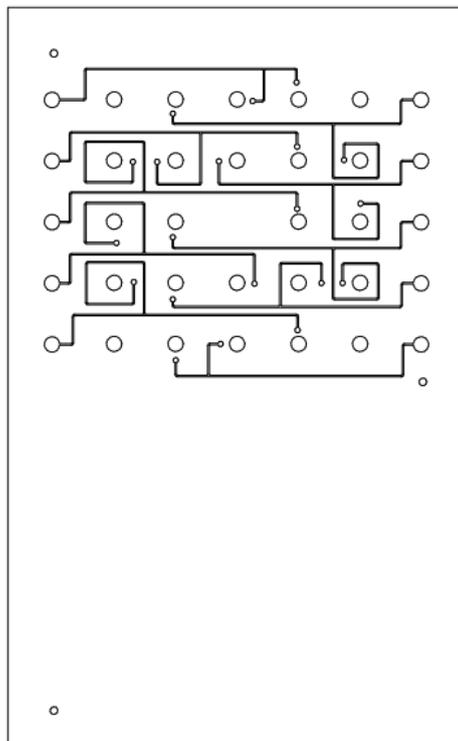
системах скорость течения, как и число Рейнольдса, малы, и имеет место ламинарное течение в каналах, то перенос вещества осуществляется преимущественно посредством диффузии. Для того, чтобы смешение реагентов было наиболее эффективным, исследована ячейка смешения, в которую суспензия бактерий и раствор антибиотика попадают с разных уровней, как представлено на рисунке 2. Исследовано также влияние направления входных каналов на эффективность смешения. Топологии исследованных элементов показаны на рисунке 3.

Процесс смешения исследовался с помощью суспензии *Viphidum bacterin* в физрастворе и 0,1 % раствора флюоресцеина в 3 мМ расворе NaOH. Раствор флюоресцеина использовали для повышения контраста.

Представленный вариант конструкции подсистемы смешения ЛНЧ для тестирования АБР соответствует требованиям технологии пленочных фоторезистов, которая уже отлично зарекомендовала себя в других областях применения, например, в гибкой электронике, и является перспективной для применения в изготовлении ЛНЧ, поскольку успешно обеспечивает дешевое, легкое и высокопроизводительное производство. Разработанный вариант конструкции микрофлюидной аналитической системы позволяет создать недорогую, компактную и простую в использовании платформу для тестирования действия антибиотиков на жизнеспособность микроорганизмов, где эффективно смешивается раствор антибиотика и суспензия бактерий.



а



б

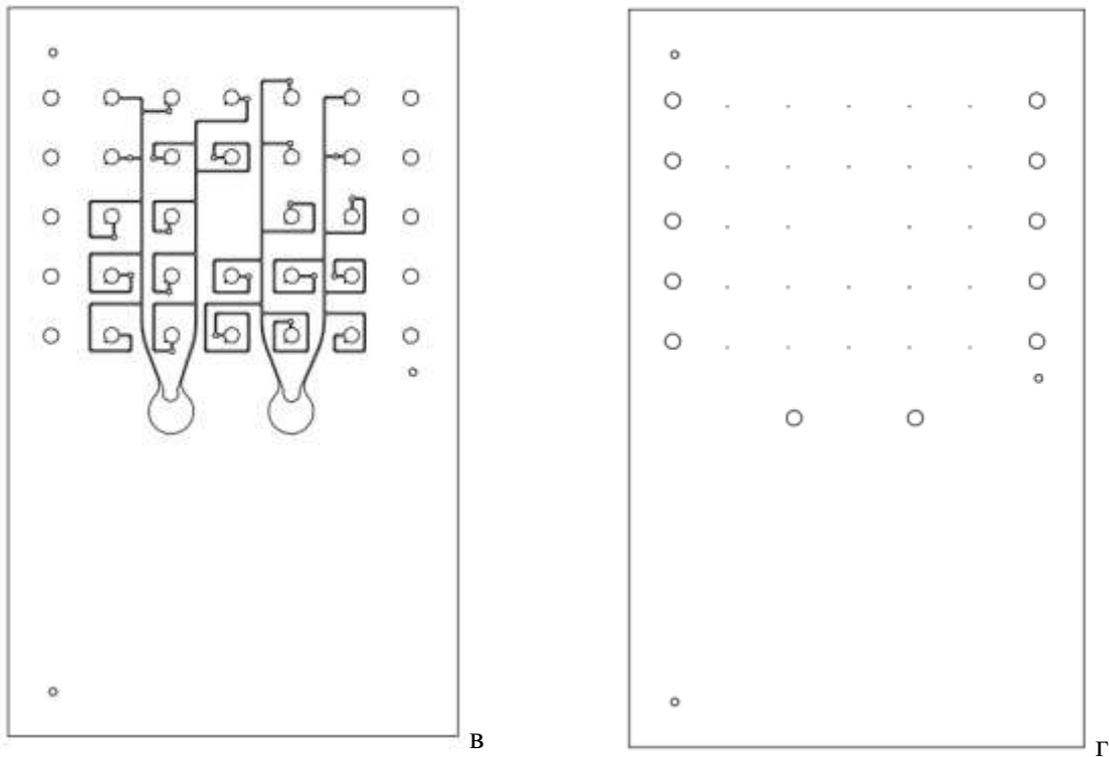


Рис. 1. а) базовый слой с отверстиями для совмещения; б) слой с разводкой каналов антибиотиков; в) главный функциональный слой с разводкой суспензии бактерий; г) верхний слой с оптическими, воздушными и подводными отверстиями.

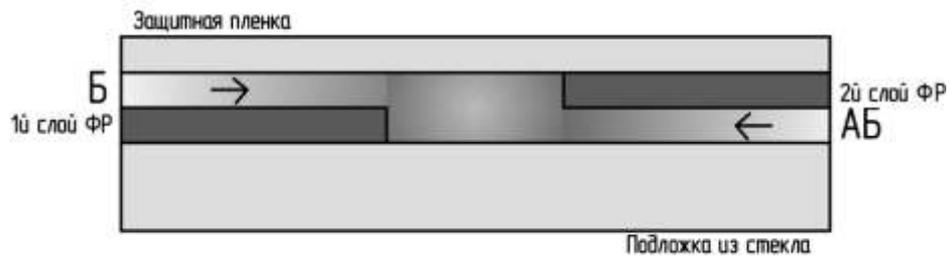


Рис. 2. Узел смешения микрофлюидной системы в разрезе: АБ-канал, подводный раствор антибиотика, выполненный в первом слое фоторезиста; Б-канал, подводный суспензию бактерий к узлу смешения, выполненный во втором слое фоторезиста.

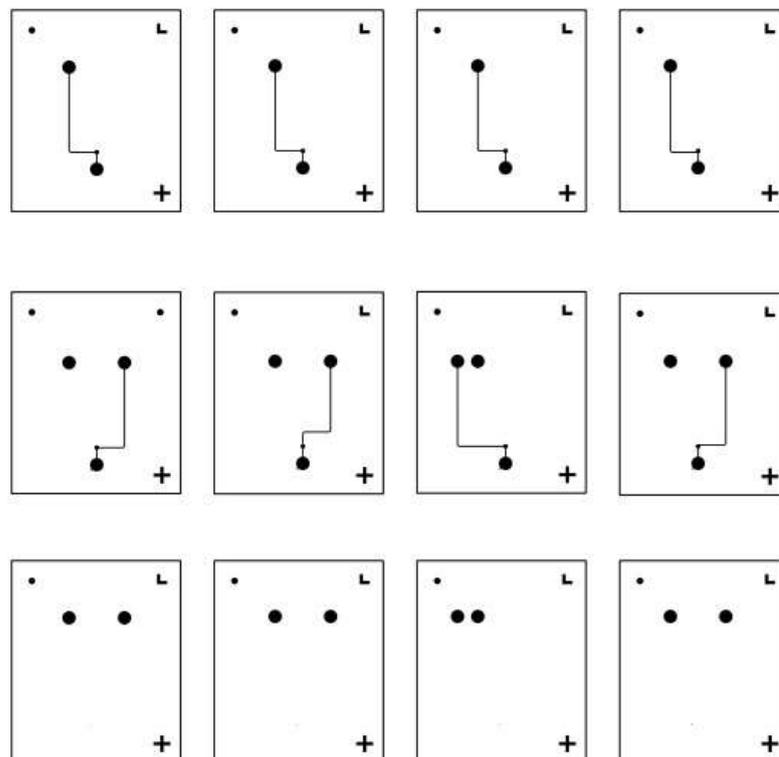


Рис. 3. Фотошаблон для исследования подсистемы смешения ЛНЧ для оптического тестирования антибиотикорезистентности микробиологических образцов

### Список литературы

1. Зими́на Т.М., Гвозде́в Ю.А., Шири́нян Т.В. Лаборатории-на-чипе: современное состояние // Биотехносфера. 2014. №6. — С. 41-66.
2. Зими́на Т. М., Соловьёв А. В., Гвозде́в Ю. А., Болтенков А. Ю., Ишбердин И. Р., Ковалев Н. Н., Лемозерский В. Е., Семенов А. И., Ситков Н. О., Соколов В. С, Титенко К. А., Хабаров П. А., Шири́нян Т. В., Краева Л. А., Хамдулаева Г. Н. Разработки СПбГЭТУ в области технологии лабораторий-на-чипе // Биотехносфера. 2015. №5. — С. 3-19.
3. Зими́на Т.М. Миниатюрные аналитические системы биомедицинского назначения — лаборатории-на-чипе // Биотехносфера. 2009. №1. — С. 11-17.
4. Zimina T. M, Luchinin V. V., Sitkov N. O., Gvozdev Yu. A., Lemoserskii V. E., Orekhov Yu. D. Hybrid-integrated lab-on-a-chip for total express-microbiological analysis: State of the art and the nearest perspectives. XIV Russian-Germany Conference on Biomedical Engineering. — 2019.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ ЧАСТИЦ УГЛЯ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ

А.С. БОЙКО, А.А. ПОНОМАРЕВА

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

**Аннотация.** Работа посвящена разработке методики создания и созданию полимерных пленок зольгель методом для использования в лазерной хирургии в качестве поглощающего покрытия. В роли прекурсора для формирования полисилоксановой сетки, удерживающей мелкие частицы угля, был выбран тетраэтоксисилан. Полученные пленки были исследованы при помощи методов ИК-спектроскопии и микроскопии.

**Ключевые слова:** золь-гель синтез, ТЭОС, тетраэтоксисилан, частицы угля, поглощающее покрытие, полисилоксановая сетка, полимерные композитные материалы, гидридные органо-неорганические материалы

## **Введение**

Методику создания и разработки композитных материалов и покрытий с принципиально новыми свойствами при помощи золь-гель синтеза начали интенсивно изучать с середины 50-х годов XX века. В настоящее время эта область продолжает активно развиваться, при этом особое внимание направлено на разработку новых методов синтеза органо-неорганических гибридных композитов. При помощи золь-гель методов в полимерную сетку, обладающую термической и химической стабильностью, можно вводить различные органические вещества в виде мономеров, олигомеров или даже полимеров. Получаемые при этом органо-неорганические материалы могут быть использованы в разнообразных формах, например, в виде тонких пленок, волокон, блоков и покрытий. Неоспоримым достоинством использования золь-гель синтеза для создания гибридных материалов служит возможность сочетания полезных свойств вводимого компонента и стабильность, как термическую, так и химическую, кремнеземной матрицы. При этом введение неорганического наполнителя приводит к повышению жесткости и прочности полисилоксановой матрицы [1].

Обширным классом органо-неорганических гибридных материалов составляют материалы на основе диоксида кремния, получаемые с использованием золь-гель технологии с участием тетраэтоксисилана (ТЭОС) в присутствии органических соединений. Механизм процесса золь-гель заключается в параллельных и последовательных реакциях гидролиза и поликонденсации, сопровождающиеся образованием силоксановых связей, составляющих основу полисилоксановой пространственно-сшитой сетки силикагеля [2]. Золь-гель синтез позволяет получать высокую степень чистоты продуктов при минимальных затратах [3].

В данной работе рассматривается возможность создания полимерных пленок на основе ТЭОС и мелких частиц угля для использования в качестве поглощающих покрытий волноводов лазеров. К данным покрытиям предъявляются следующие требования: малая степень токсичности, высокая степень адгезии к оптоволокну, высокая поглощающая способность. ТЭОС широко используется в стоматологии и технологии керамики в качестве самоотверждающегося компонента. Исследования показывают, что полимерные пленки на основе ТЭОС являются малотоксичными, безопасными и не наносящими вреда природе и здоровью человека [4]. ТЭОС также обладает высокими адгезионными свойствами к поверхности оптоволокну вследствие его взаимодействия с силанольными группами, в результате чего происходит образование сплошного мономолекулярного покрытия [5]. Частицы угля в данной композиционной системе выступают в роли компонента, поглощающего лазерное излучение.

## **Экспериментальная часть**

Золь-гель технология подразумевает получение золя, который в последующем переводится в гелеобразное состояние. Синтез золь-гель протекает в несколько стадий, которые включают в себя:

Приготовление коллоидного раствора — золь;

Образование геля — связанодисперсной системы, состоящей из непрерывной жидкой и твердой фазы. Процесс перехода из золя в гель достаточно сложный процесс и может занимать в зависимости от условий разное количество времени — от секунд до многих месяцев [6];

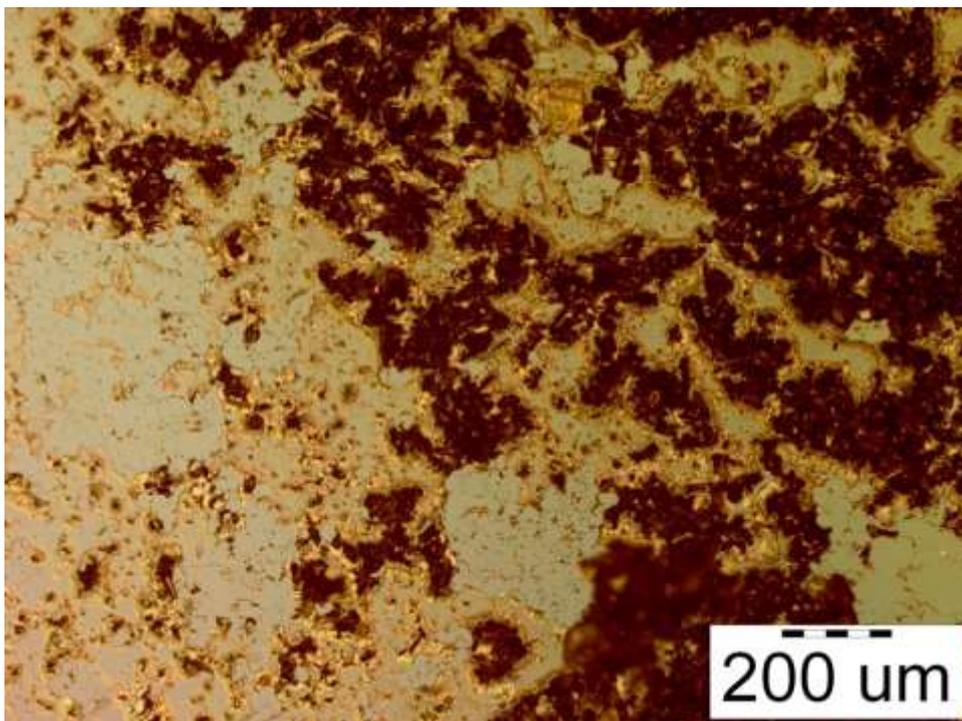
Процесс удаления лишней жидкости из пространственной сетки геля — сушка;

Термообработка при более высоких температурах по сравнению с протеканием сушки [7].

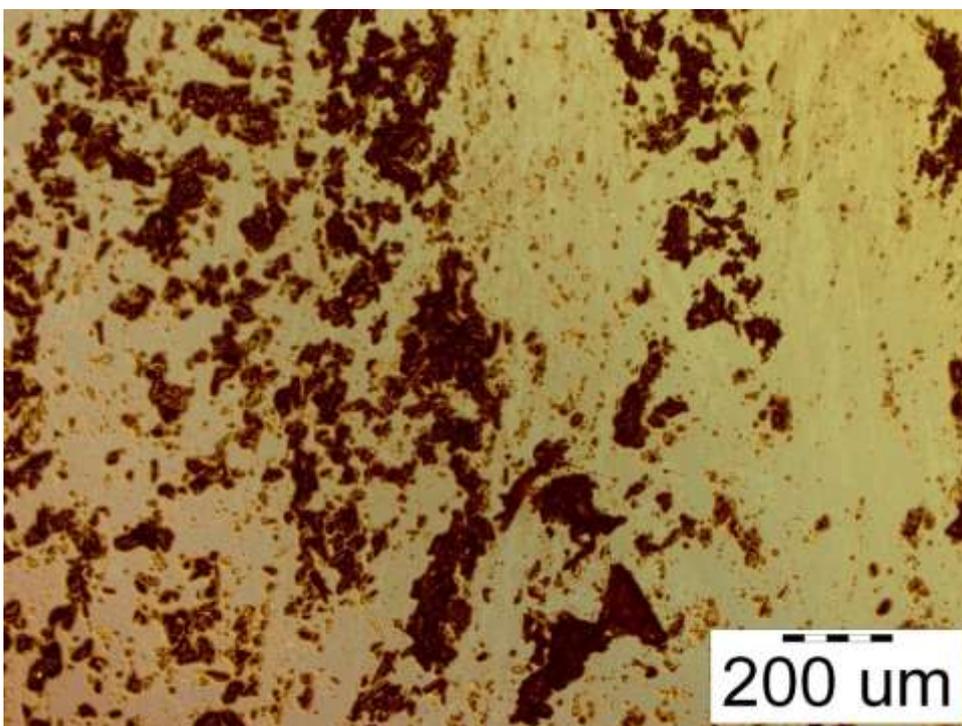
Пленкообразующие растворы получали на основе ТЭОС и 96% раствора этилового спирта. Для стабилизации угля как наполнителя, его предварительно измельчали и выдерживали сутки в уксусной кислоте. В процессе выдерживания на уголь адсорбировались молекулы уксусной кислоты. Далее частицы угля фильтровали и высушивали для добавления в золь. Готовый раствор — золь оставляли на сутки для протекания реакций гидролиза и конденсации на 24 часа. По истечении данного времени полученный раствор наносили на кварцевое стекло в три слоя. Каждый слой сушили при 150°C в течение 1 часа. Далее для полного удаления растворителя и летучих продуктов гидролиза проводился обжиг пленки при 280°C в лабораторной печи в течение 1 часа.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что количество ТЭОС в растворе сильно влияет на адгезию к используемым материалам. Оптимальные мольные соотношения ТЭОС к этиловому спирту составляют 1:128 и 1:64, при этом 1:64 является лучшим соотношением из всех исследуемых. Также были исследованы соотношения 1:32, 1: 16 и 1:8, однако данные растворы обладали менее адгезивными свойствами. Стоит отметить, что образование геля в растворах с мольным соотношением ТЭОС к растворителю 1:128 и 1:64 происходит быстрее, чем в растворах с большей концентрацией ТЭОС. Полученные полимерные пленки были исследованы при помощи ИК-спектроскопии НПВО. На спектрах наблюдается пик при 1053 см<sup>-1</sup>, который соответствует колебаниям силоксановых связей [8], что указывает на протекание реакции гидrolитической конденсации и наличия полисилоксановой сетки.

При помощи микроскопии было исследовано строение пленок на основе ТЭОС с добавлением угля с отжигом при 280°C и без него — только после проведения сушки при 150°C в течение часа.



*Рис. 1. Микрофотография полимерной пленки после отжига при 280°C*



*Рис. 2. Микрофотография полимерной пленки без отжига при 280°C.*

По микрофотографии (рис. 1) можно сделать вывод о том, что после проведения отжига наблюдается упрочнение и затвердевание пленки. Также видны участки, где наблюдается отсутствие материала, что может говорить о перегревании материала и его отслоении. По микрофотографии материала, который не подвергался отжигу

(рис. 2), наблюдается полное покрытие стекла и встраивание частиц угля в полимерную сетку, при этом видно, что в материале присутствуют остатки растворителя.

#### **Вывод.**

В работе показано, что золь-гель технология является перспективным методом создания материалов с абсолютно новыми свойствами и характеристиками, описаны основные стадии золь-гель технологии. Выбраны основные компоненты для создания растворов: ТЭОС, водный раствор этилового спирта 96%. Для лучшего встраивания угля было предложено выдерживать его в уксусной кислоте в течение 24 часов с последующим фильтрованием и высушиванием.

В ходе работы была предложена методика создания полимерной пленки на кварцевой подложке на основе ТЭОС. Выяснено, что наиболее подходящим мольным соотношением растворителя — этилового спирта к ТЭОС является 1:64. Проведен анализ ИК-спектров полученных растворов и изучены микроснимки полимерных пленок при сушке (150°C) и при сушке (150°C) с отжигом при 280°C. В будущем планируется проведение испытаний полученных пленок на способность к поглощению лазерного излучения и их непосредственное нанесение на торец оптоволокна.

#### **Список литературы**

1. Бочкарёва С. С. Синтез гибридных композитов золь-гель методом //Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. — 2016. — №. 3 (18). — С. 81-93.
2. Chung C.-M., Lee S.-J., Kim J.-C., Jang D.- O. Organic-inorganic hybrids based on unsaturated polyester //
3. J. Non-Cryst. Solids. 2002. Vol. 311, N 2. P. 195–198.
4. Томильскайте В. А., Файбисович Е. С., Кузьмин Н. С. Нанесение покрытий на основе высокочистого диоксида кремния и органических соединений. — 2013.
5. Чухланов В. Ю., Селиванов О. Г., Трифонова Т. А. Поливинилацетатные связующие материалы, модифицированные алкоксисиланом //Строительные материалы. — 2014. — №. 9. — С. 52-54.
6. Чухланов В. Ю. и др. Разработка и исследование свойств защитного покрытия на основе модифицированного полиуретана //Фундаментальные исследования. — 2014.
7. Евстропьев С. К., Никоноров Н. В. Жидкостные методы получения оптических наноматериалов //СПб: Университет ИТМО. — 2018.
8. Мошников В. А. и др. Золь-гель технология микро-и нанокомпозитов. — 2013.
9. Казаченок Е. А., Богомазова Н. В., Жарский И. М. Влияние условий термообработки на свойства пленок SiO<sub>2</sub> [2], полученных из растворов тетраэтоксисилана. — 1999.

## **РАЗРАБОТКА МИКРОФЛЮИДНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА**

К.Е.БРУСИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе представлены результаты разработки системы для экспресс-анализа антибиотикорезистентности бактерий на основе импедансной спектроскопии. Изготовленный чип содержит микрофлюидную систему для транспорта пробы и систему электродов для измерения комплексного сопротивления. Эффективность системы протестирована на суспензии E.coli M-17 с цефтриаксоном и безилпенициллином.

*Ключевые слова:* импедансная спектроскопия, микрофлюидная система, антибиотикорезистентность

## Введение

Инфекционные заболевания бактериальной природы являются одними из наиболее широко распространенных. Их успешное лечение зависит от своевременного назначения эффективного антимикробного препарата. Традиционные методы анализа восприимчивости к антибиотикам, как правило, занимают от 3 до 7 дней. Поэтому существует необходимость в разработке новых средств для экспресс-тестирования антибиотикорезистентности различных микроорганизмов. Такие средства могут быть реализованы на основе биологических микро- и наносистем, или лабораторий-на-чипе, в матрице которых интегрированы различные процессы: подготовка проб, их сортировка, очистка и анализ на основе различных сенсорных принципов. Связывание этих процессов осуществляется с помощью микрофлюидной системы.

## Материалы и методы

Импедансная спектроскопия, т.е. измерение и анализ зависимости комплексного электрического сопротивления суспензии микробиологических объектов от частоты переменного тока, — это один из методов исследования их характеристик. С помощью импедансной спектроскопии можно исследовать поведение микроорганизмов в электрическом поле. Одним из ключевых этапов анализа и интерпретации импедансных измерений является построение эквивалентных схем замещения. Любую суспензию бактерий можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из резисторов и конденсаторов (рис. 1). Резистор  $R_1$  соответствует сопротивлению среды, резистор  $R_2$  — сопротивлению цитоплазмы бактерии, конденсатор  $C_2$  — емкости конденсатора с обкладками из клеточной стенки бактерии [1].

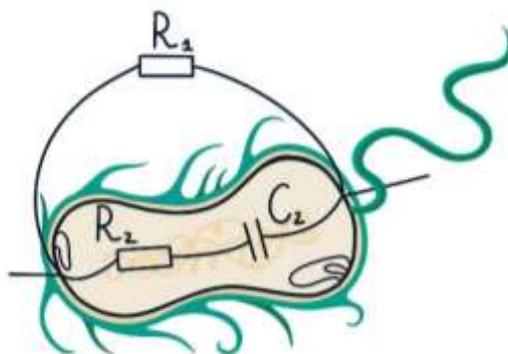


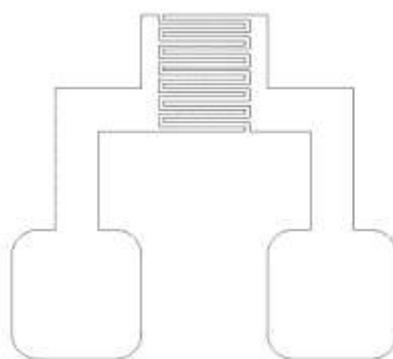
Рис. 1. Схематическое изображение эквивалентной электрической схемы замещения для бактерии.

Антибиотики могут нарушать целостность структуры бактерий, разрушать клеточные стенки, что в результате приводит к изменению сопротивления системы [2]. Уменьшение сопротивления указывает на разрушение бактерии. Таким образом, исследование импедансных зависимостей микроорганизмов может быть использовано для оценки их восприимчивости к антимикробным препаратам.

Для исследования антибиотикорезистентности бактерий разработан чип, содержащий микрофлюидную систему, необходимую для транспорта пробы, а также систему электродов для измерения импеданса.

Первым этапом изготовления системы является разработка ее топологии и конструкции. Для проведения импедансных измерений часто используются гребенчатые электроды (рис. 2), между которыми при подаче постоянного

или переменного тока создается электрическое поле. В присутствии бактерий это поле изменяется. Расстояние между электродами подбирается с учетом характерных размеров бактерий. Известно, что максимальная чувствительность электродов достигается при уменьшении толщины шипов и расстояния между ними, так как при этом увеличивается плотность линий электрического поля. Для определения оптимальной конфигурации электродов были разработаны образцы электродов с разными расстояниями между шипами — 100 мкм и 50 мкм. В качестве материала для изготовления электродов выбран титан, так как он является биологически инертным материалом [3]. Другими его преимуществами являются малая скорость коррозии в водной среде, высокая прочность и малый вес.



*Рис. 2. Топология электродов для анализа антибиотикорезистентности бактерий.*

С использованием разработанных фотошаблонов на предметные стекла нанесены электроды. Ключевые технологии, использованные для изготовления электродов, — магнетронное распыление и фотолитография.

Для формирования микрофлюидных каналов протестированы два пленочных фоторезиста — ORDYL ALPHA 350 и ORDYL FP 440. Для повышения производительности микрофлюидных систем сформированы микрофлюидные каналы с использованием двух поочередно нанесенных слоев фоторезиста. Оптимальным материалом для изготовления многослойных систем оказался фоторезист ORDYL FP 440. В случае использования фоторезиста ORDYL ALPHA 350 для построения многослойных систем наблюдались вспученности и невысокое аспектное соотношение стенок каналов.

Для формирования микрофлюидных каналов на предметные стекла с электродами наносится слой фоторезиста, после чего стекло ламинируется для улучшения адгезии. Затем наносится второй слой фоторезиста и так же ламинируется. После этого пленку фоторезиста освещают через специальный фотошаблон ультрафиолетовым светом. Экспонированные места фоторезиста полимеризуются и становятся нерастворимыми. Экспериментально подобрано время экспозиции — 140 с. Незаполимеризованные части фоторезиста смываются в растворе кальцинированной соды. Оптимальное время выдержки в растворе — 240 с. Для остановки реакции стекло промывается в воде в течение 30 с.

Последний этап формирования микрофлюидного чипа — его герметизация. Была подобрана прозрачная полимерная пленка толщиной 140 мкм.

Последовательность формирования микрофлюидной системы представлен на рис. 3.

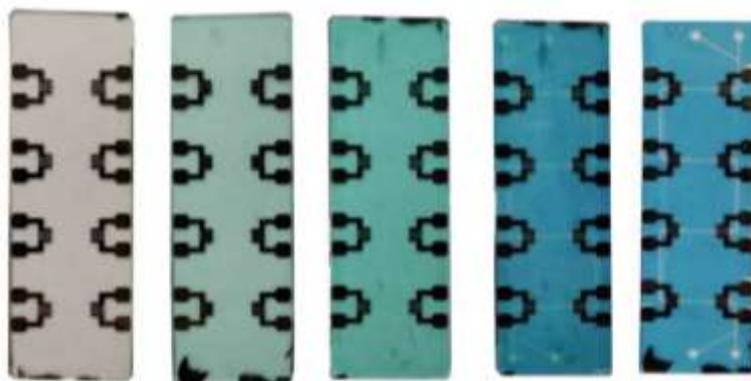


Рис. 3. Последовательность формирования микрофлюидной системы.

### Результаты и обсуждение

На рис. 4 а и б представлены результаты измерений зависимости модуля электрического импеданса от частоты  $|Z|(f)$  в суспензии *E.coli* M-17 с цефтриаксоном и безилпенициллином.

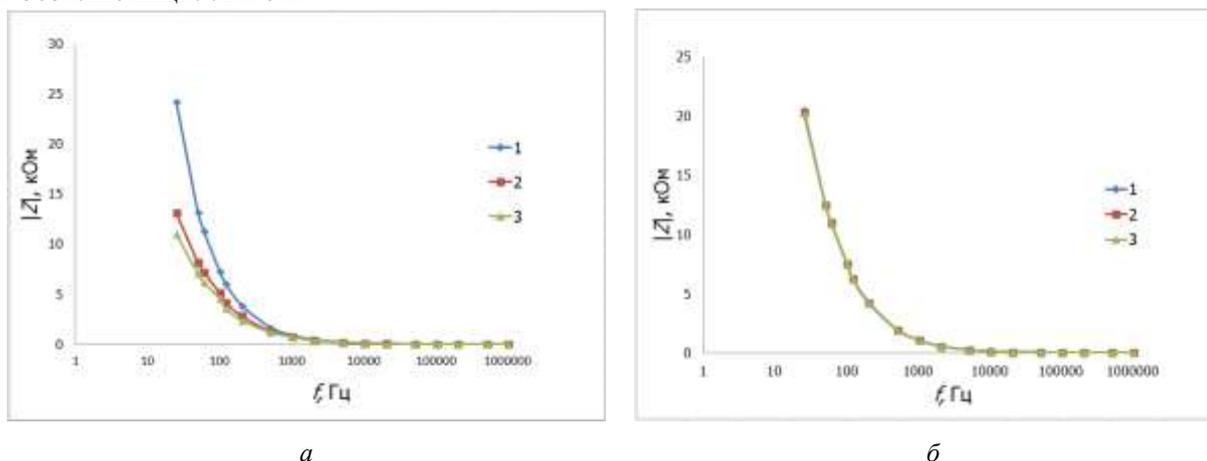


Рис. 4. Частотные зависимости модуля электрического импеданса в водной суспензии *E.coli* M-17: а — с цефтриаксоном (1 — в начальный момент времени; 2 — через 1 час; 3 — через 2 часа); б — с безилпенициллином (1 — в начальный момент времени; 2 — через 1 час; 3 — через 2 часа).

В результате проведенных измерений удалось продемонстрировать эффективность разработанной системы для оценки антибиотикорезистентности *E.coli* M-17.

### Заключение.

Развитие технологического базиса микро- и наносистемной техники открывают новые возможности для создания аналитических микросистем биомедицинского назначения. Сенсорные системы на основе электрического импеданса имеют высокий потенциал интегрирования в аналитические микросистемы для решения целого класса задач. В данной работе продемонстрирована эффективность использования импедиметрического сенсора для оценки восприимчивости микроорганизмов к антибиотикам на примере непатогенного штамма *E.coli* M-17.

### Список литературы

1. Шван Г. Спектроскопия биологических веществ в поле переменного тока // Электроника и кибернетика в биологии и медицине. М.: ИЛ. — 1963. — С. 71-108.

2. Karbelkar A. A., Furst A. L. Electrochemical diagnostics for bacterial infectious diseases //ACS Infectious Diseases. — 2020. — Т. 6. — №. 7. — С. 1567-1571.
3. Ситков Н. О. и др. Интегрируемый в лабораторию-на-чипе миниатюрный сенсорный элемент на основе электрического импеданса для оценки антибиотикорезистентности микроорганизмов // Биотехносфера. — 2017. — №. 3. — С. 34-47.

## **ПРОТОТИП АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ ПАЦИЕНТА НА БИНОУРАЛЬНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

А.Е. ГАПАНЕНОК

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** С возрастом чувствительность слуха у человека уменьшается и прежде всего в области верхних частот звукового диапазона. Как правило, человек теряет слух постепенно. Сначала «исчезают» наиболее тихие, невыразительные звуки и тончайшие нюансы. Из-за этого человеку сложно самому констатировать изменение способности слышать. Поэтому необходима автоматизированная система, которая бы с высокой точностью выявляла нарушения слухового восприятия человека. Разрабатываемая система выявляет нарушения слуха не по субъективным ответам пациента во время стандартного тестирования, а по реакции головного мозга на акустические сигналы.

*Ключевые слова:* автоматизированная система, сурдолог, реакция головного мозга, ЭЭГ.

Человек с нормальным слухом воспринимает достаточно широкий диапазон звуковых колебаний [1]. Но в следствии различных причин таких, как травмы, инфекционные поражения, врождённые патологии, острота слухового восприятия человека может резко снижаться или исчезать полностью.

В аудиометрии существует понятие критерия слуховой нормы — ею считается уровень слухового восприятия, когда графики слуховых ощущений пациента — аудиограммы лежат в диапазоне от 0 до 25дБ [2].

Существует множество особенностей слухового восприятия человека, которые снижают критерий слуховой нормы и все они характеризуются качеством звукопередачи. Правильно определить качество звукопередачи можно только совместно изучив субъективные ощущения человека и объективные характеристики звука такие, как интенсивность и частота тона.

Интенсивность звука определяется силой звукового давления, которое у человека весьма вариабельно. Поэтому для удобства принято пользоваться относительными величинами, такими как децибелы (дБ) — это десятичная шкала логарифмов.

Частоту тона оценивают количеством звуковых колебаний в секунду и выражают в герцах (Гц). Условно диапазон звуковых частот делят на низкие — ниже 500Гц, средние (речевые) 500 – 4000Гц и высокие — 4000Гц и выше [3].

Проверка и контроль слухового восприятия очень важны, ведь от качества слуха зависит и качество жизни человека. Уровень слуха влияет и на психическое состояние человека, и на возможность свободно общаться с другими людьми.

На сегодняшний день проверка слуха представляет собой не сложную, безболезненную процедуру, пройти которую можно в медицинских учреждениях у врача — сурдолога.

Поэтому необходима автоматизированная система, которая бы с высокой точностью выявляла нарушения слухового восприятия человека. Разрабатываемая система выявляет нарушения слуха не по субъективным ответам пациента во время стандартного тестирования, а по реакции головного мозга на акустические сигналы, структура данной системы представлена на рис. 1.

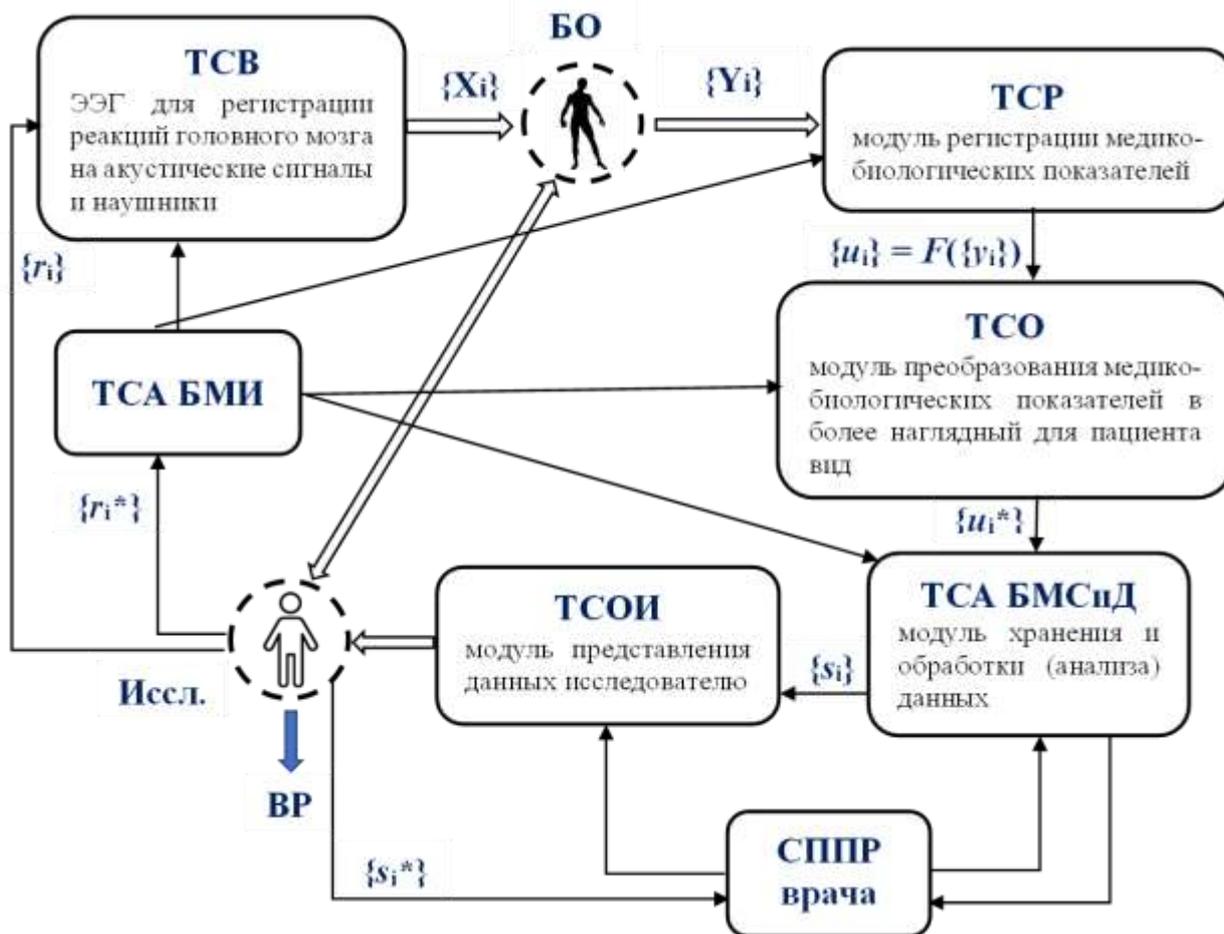


Рис. 1. Структура разрабатываемой системы.

Система включает в себя пять модулей: модуль регистрации медико-биологических показателей, модуль преобразования медико-биологических показателей в более наглядный для пациента вид, модуль хранения и обработки (анализа) данных, модуль представления данных исследователю, данные модули представлены на рис. 1 помимо них в системе есть еще модуль настроек и калибровки. Также в системе есть ЭЭГ для регистрации реакций головного мозга на акустические сигналы и наушники.

$\{x_i\}$  — акустический сигнал, поступающий к пациенту через наушники;

$\{y_i\}$  — реакция головного мозга пациента на акустический сигнал, поступающий к пациенту через наушники;

$\{u_i\}$  — реакция головного мозга пациента на акустический сигнал, который необходимо преобразовать в более наглядный вид;

$\{u_i^*\}$  — данные после обработки;

$\{s_i\}$  — данные после обработки;

$\{s_i^*\}$  — параметры сигнала, задаваемые врачом и подстраиваемые под пациента;

$\{r_i^*\}$  — сигнал, подаваемый пациенту через наушники.

Контур управления: контур регистрации реакции, контур управляющих воздействий, контур обработки биомедицинской информации, контур формирования управляющих воздействий, контур представления данных пациенту.

Каналы информационного обмена: информационный обмен происходит от средств регистрации (наушников и ЭЭГ) к ПК через USB или Bluetooth, далее в программу анализа и обработки сигналов с автоматизированной базой данных, и систему помощи принятия решений.

Состав обеспечений системы: система состоит из методического, информационного, программно-алгоритмического, метрологического и инструментального обеспечения.



Рис. 2. Схема возникновения слуховых ощущений.

Модуль настроек и калибровки нужен для того, чтобы настроить внешний вид программы и откалибровать тестовый сигнал. Данный модуль делает систему наиболее точной.

Модуль регистрации медико-биологических показателей нужен для регистрации показателей пациента, то есть характеристик слуха пациента и реакции головного мозга пациента на входящий преобразованный сигнал.

Модуль преобразования медико-биологических показателей в более наглядный для пациента вид. Чтобы составить заключение о слуховых особенностях пациента.

Модуль хранения и обработки (анализа) данных нужен для того, чтобы проанализировать и обработать данные о медико-биологических данных пациента, а также для анализа откалиброванного тестового сигнала.

Модуль представления данных исследователю этот модуль нужен чтобы предоставить и отобразить все необходимые данные исследователю.

Вид математической модели, используемой при разработке системы: при разработке данной системы использована модель восприятия звуков, так как она наиболее полно отражает основной процесс, происходящий в разрабатываемой системе.

Для начала необходимо разобраться в схеме возникновения слуховых ощущений, которая изображена на рисунке 2 [4].

Уровень адекватности разрабатываемой модели: адекватность — это уровень соответствия модели реальному объекту. Разрабатываемая модель имеет высокий уровень адекватности, так как наиболее приближена к реальному звуковосприятию человека [5].

### Список литературы

1. Food Health. URL: <https://foodandhealth.ru/diagnostika/audiometriya/>
2. Sopli.net. URL: <https://sopli-net.turbopages.org/s/sopli.net/audiometria/euromax>. <http://euromax.ru/blog/audiogram/>
3. Схемы и таблицы. Схемо РФ URL: <https://cxemo.pf/schema/26698-shema-vozniknovenija-sluhovyh-oschuschenii.html>.
4. Studme.org URL: [https://studme.org/163940/informatika/adekvatnost\\_Modeli](https://studme.org/163940/informatika/adekvatnost_Modeli).

## ВЛИЯНИЕ BLUETOOTH-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЯГКИЕ ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА

Д.Д. ЛОГИНОВА

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*

**Аннотация.** В статье рассмотрена одна из наиболее популярных тем на данный момент: «как воздействуют беспроводные наушники на мозг человека?». В наушниках, чтобы передавать данные на расстоянии, используется Bluetooth. Для определения поглощения тканями данного типа излучения применено понятие «удельного коэффициента поглощения». Текущая задача решена и проанализирована при помощи программного обеспечения для мультифизического моделирования.

**Ключевые слова:** *Моделирование, Bluetooth-излучение, головной мозг*

### Введение

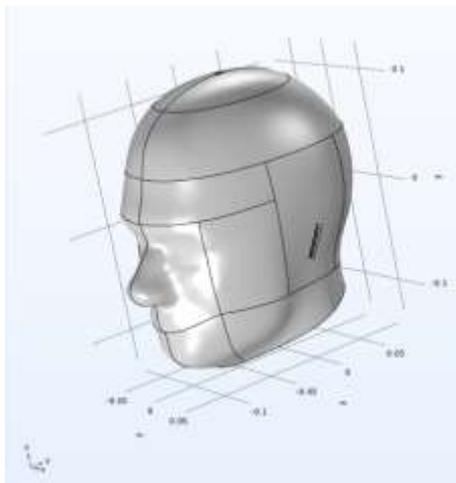
В последнее время большую популярность обрели беспроводные наушники. Порой люди носят их по несколько часов, не снимая, но мало тех, кто задумывался, какой вред они могут нанести здоровью. Риск развития многих заболеваний связан с длительным воздействием электромагнитных волн (ЭМВ), которые генерируются антенной, находящейся в корпусе наушников. Ученые до сих пор спорят, насколько опасно такое продолжительное влияние ЭМВ [1]. Тем не менее для оценки эффекта, оказываемого радиочастотным источником излучения, был введен удельный коэффициент поглощения электромагнитной энергии биологической тканью (англ. — SAR). Именно определению влияния Bluetooth-излучения на головной мозг человека и, в том числе, расчету показателя SAR посвящена текущая работа.

### Моделирование

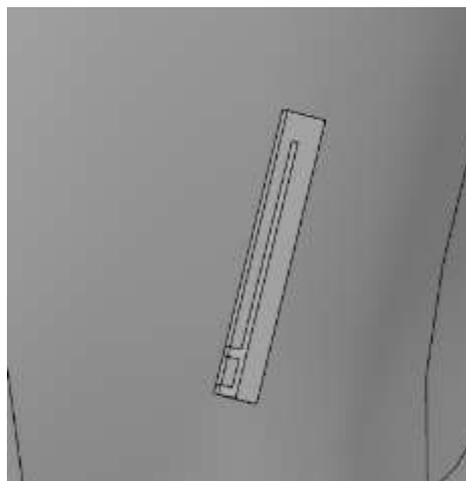
Для моделирования излучения электромагнитных волн антенной и расчетов показателя используется специализированное программное обеспечение COMSOL

Multiphysics. Модель человеческой головы представляет собой SAM-фантом по стандартам IEEE, IEC и CENELEC. Отдельно стоит подчеркнуть, что диэлектрическая проницаемость, проводимость и скорость перфузии крови неоднородны в головном мозге. Поэтому такое распределение задается напрямую. Ввиду наличия в открытом доступе текстового файла, содержащего данные о 109 срезах МРТ головного мозга, стало возможным задать распределение, применяя интерполяционную функцию. COMSOL Multiphysics позволяет задать свойства головного мозга как функцию от X,Y,Z-координат.

В качестве модели антенны, представленной на рисунке 1, используется антенна PIFA, так как она наиболее часто применяется в беспроводных технологиях и имеет хороший показатель SAR. Дизайн антенны взят из работы [2]. Ее характеристики рассчитаны таким образом, что длина полосы (пина) излучения составляет 26 мм, что примерно равно 1/4 длины частоты Bluetooth-излучения (это 2442 МГц). Длина пина замыкания от «земли» до полосы излучения составляет 7,8 мм. Свойства подложки заданы для стеклотекстолита FR4, размеры которой приблизительно соответствуют размерам антенны, используемой в беспроводных наушниках (рис. 2).



*Рис. 1. Модель человеческой головы с антенной.*



*Рис. 2. Модель антенны.*

Для данной антенны в среде COMSOL Multiphysics задается физика: металлическая полоска представляет собой идеальный электрический проводник, а для порта питания

значение напряжения устанавливается таким, чтобы на выходе мощность антенны соответствовала реальной мощности антенны наушников (около 0,5 мВт).

Моделирование должно производиться в небольшой области вокруг антенны. Для такого ограничения используется область «Идеально согласованный слой» [3]. В результате решения данной задачи с помощью метода конечных элементов были получены важные показатели, позволяющие судить о характере влияния ЭМВ, излучаемых рассмотренным типом антенны, на головной мозг человека.

### Результаты

Около 20 лет назад был введен коэффициент SAR для подавления паники среди людей о вреде электромагнитного излучения, испускаемого устройствами. В США единицей измерения данного коэффициента является Вт/кг, причем предел радиочастотного излучения составляет 1,6 Вт/кг. В России же более ужесточенный стандарт (SAR измеряется в микроваттах на квадратный сантиметр). Согласно СанПиНу предельный допустимый уровень удельного коэффициента поглощения электромагнитной энергии равен 10 мкВт/см<sup>2</sup>. В соответствии с полученными результатами SAR по американским стандартам входит в норму (рис. 3), в то время как по российским превышает в 5 раз установленную границу (рис. 4).

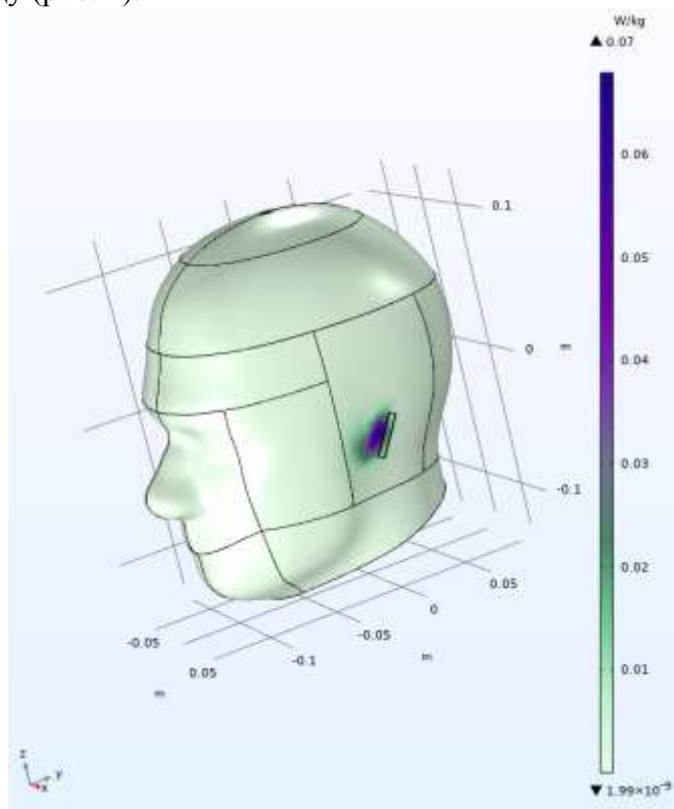


Рис. 3. SAR согласно американскому стандарту.

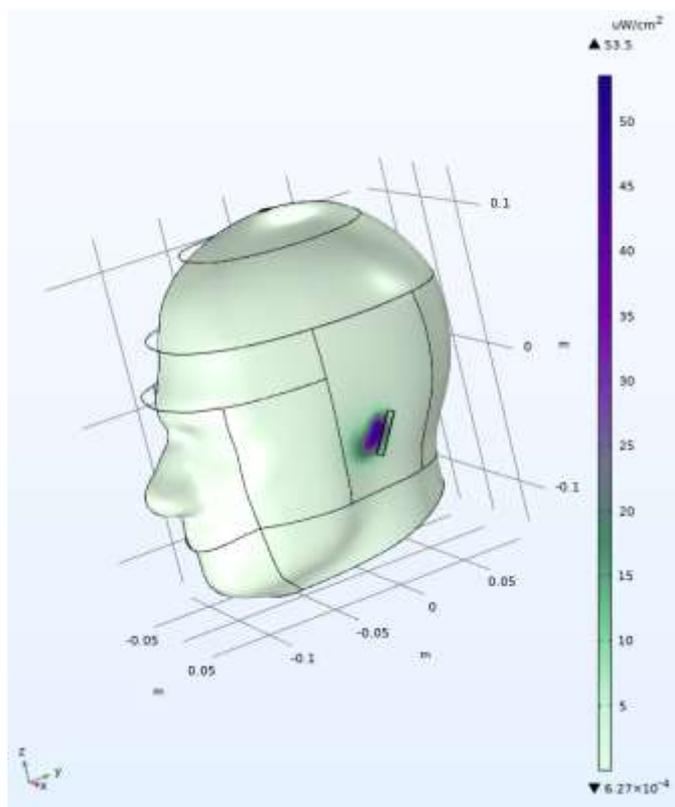
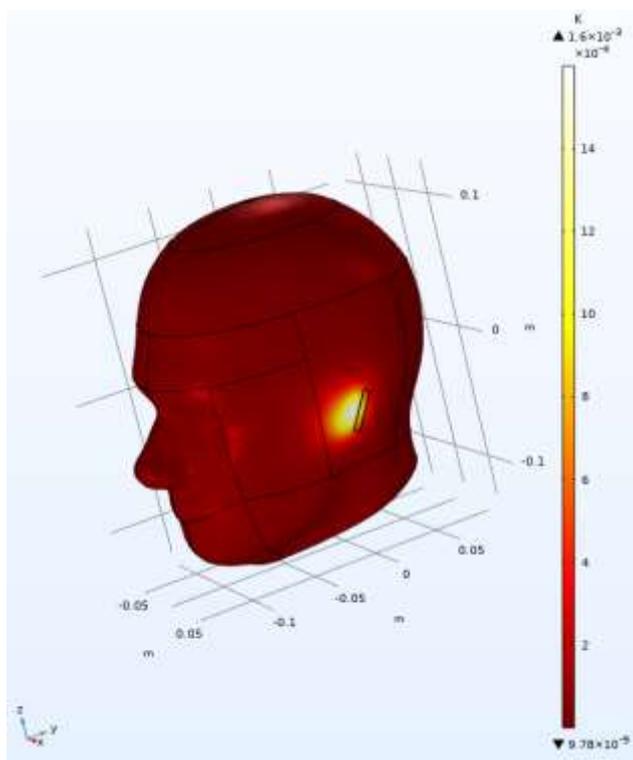


Рис. 4. SAR согласно российскому стандарту.

Еще одним критерием, позволяющим дать оценку влияния электромагнитного излучения, является локальный нагрев биологической ткани рядом с антенной. Видно, что максимальное значение нагрева ткани составляет  $1,6 \times 10^{-3}$  К (рис. 5).



*Рис. 5. Нагрев биологической ткани рядом с антенной.*

## **Выводы**

Результатом выполнения данной работы является моделирование электромагнитных волн, генерируемых антенной беспроводных наушников, находящейся рядом с головным мозгом человека. Как было сказано ранее, по американским нормам устройство с упомянутым выше типом антенны можно использовать без вреда для организма, что совершенно противоречит российским нормам. Также, посчитанное значение нагрева ткани достаточно мало и не позволяет говорить об отрицательном влиянии исследуемого излучения. Таким образом, моделирование такого рода позволяет рассмотреть принципы воздействия электромагнитного излучения на мягкие ткани, оценить степень поглощения электромагнитной энергии и эффект, оказываемый ею на здоровье человека.

## **Список литературы**

1. No, '250 scientists' didn't warn that AirPods are a cancer risk [Electronic resource]. — URL: <https://forums.appleinsider.com/discussion/210683#top> (date of treatment: 25.04.2022).
2. Wong Kin-Lu, Hsu Ming-Ren, Li Wei-Yu, Su Saou-Wen, Chen Austin. (2007). Study of the Bluetooth headset antenna with the user's head Microw. Microwave and Optical Technology Letters. 49. 19 — 23. DOI: 10.1002/mop.22047
3. Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Brain [Electronic resource]. — URL: <https://www.comsol.com/model/specific-absorption-rate-sar-in-the-human-brain-2190> (date of treatment: 28.02.2022).

# **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОНАСОСОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ИОННОГО ПЕРЕНОСА, ИМЕЮЩИХ ПОТЕНЦИАЛ ИНТЕРИРОВАНИЯ В ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Р.Р. СИБГАТОВ, Т.М. ЗИМИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Возрастающий интерес к миниатюрным гибридным устройствам для тераностики определяет потребность в создании для них интегрируемых функциональных элементов. Одним из важнейших элементов, необходимых в микрофлюидных устройствах является микронасос, в особенности интегрируемый вариант МЕМС формата. Микронасосы необходимы для обеспечения переноса жидких проб в микрофлюидных системах, дозировки биологических проб, подачи реагентов и др. Данная работа посвящена сравнительному анализу немеханических микронасосов, функционирующих на основе принципа ионного переноса, и определению наиболее перспективных вариантов для интегрирования в гибридные лаборатории-на-чипе. Рассматриваются инжекционные, индукционные, кондукционные, электроосмотические насосы и насосы на основе электросопряженных жидкостей.

**Ключевые слова:** микронасосы, принцип ионного переноса, МЕМС

## **1. Электрогидродинамические насосы**

### **1.1. Инжекционный насос**

Известна конфигурация инжекционного насоса, содержащего 74 пары электродов, применяемого для системы охлаждения [1]. Насос содержит пилообразные эмиттеры и плоский коллектор (табл. 1(1)). Для формирования потока к эмиттеру прикладывается положительный потенциал, а коллектор заземляется. По результатам экспериментов получена объемная скорость примерно 150 мкл/мин при напряжении 1700 В. Также в таблице 1 (2) представлен пример инжекционного микронасоса из работы [2].

### **1.2. Индукционный микронасос**

Предложен новый тип микронасоса на чипе, который использует электрокинетические силы переменного тока в градиенте температуры [3]. При этом скорость потока зависит от частоты и амплитуды поля, а также и от величины температурного градиента. Насос изготовлен на стеклянной подложке, профиль канала и герметизирующая крышка изготовлены из полимера и стекла, соответственно. В среде с электропроводностью  $0.1 — 1.3 \text{ См м}^{-1}$  и частотой приложенного напряжения 300 кГц — 52 МГц с амплитудой 0 — 35 В, при напряжении на нагревательном элементе 1,1 — 3,6 В, достигались скорости потока до 120 мкм/с.

### **1.3. Кондукционный микронасос**

Конструкция кондукционного микронасоса на основе гетерозаряда [4] формируется с помощью ассиметричной конфигурации электродов, расположенных на стенках каналов (таблица 1(4)). Рассматривается конфигурация с характерным размером 0,8 мм и 10 электродными парами, для которой была достигнута объемная скорость  $\approx 1$  мл/мин при напряжении 0,8 кВ. При этом отмечается, что теплопередающая способность как минимум на два порядка выше, чем потребляемая мощность. Также в таблице 1(5) представлен микронасос из работы [5].

### **1.4. Насосы на основе электроконъюгированных жидкостей**

Электроконъюгированные жидкости (ЭКЖ) генерируют мощную струю, когда приложено большое постоянное напряжение [6]. Примерами таких жидкостей являются: дибутил себакат, линалилацетат, дибутил адипат [7]. Отличительными особенностями данного принципа является более низкое пороговое напряжение, чем у инжекционного; возможность создания потоков в разных направлениях, создание потока в гомогенной среде без температурного градиента. Предложено два механизма, максвелловский градиент давления [7] и эффект Онсагера [6]. Примером применения ЭСЖ является конструкция из двух встречных треугольных призм и щели между ними [8] (таблица 1(6)). Получена объемная скорость  $81,9 \text{ мм}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  при приложенном напряжении 2 кВ.

### **1.5. Электроосмотических насосах**

#### **1.5.1. Электроосмотический насос постоянного тока**

В работе [9] описан насос, представляющий собой канал, заполненный микросферами из кремнезема, к концам которого приложено постоянное напряжение (таблица 1.(7)). Показано, что максимальное давление составляет 25 атм, а максимальная объемная скорость 85 нл/мин при приложенном напряжении 3500 В.

#### **1.5.2. Электроосмотический насос переменного тока**

Данный вид основан на явлении перераспределения зарядов: под действием переменного поля на границе электрод-жидкость индуцируются избыточные заряды,

которые перемещаются полем. Локальность данного процесса позволяет снизить величину рабочего напряжения. В работе [10] рассматривается конфигурация данного насоса с 3D структурой из 6012 пар электродов. Принципиальная схема данного насоса представлена в таблице 1.(8): на подложку из стекла нанесены электроды разной высоты, за счет чего противодействующее влияние объемной скорости, создаваемое более низким электродом, способствует формированию вихря и направленного потока. По экспериментальным данным в данной работе было получено, что в данном типе могут достигаться высокие линейные скорости (1,3 мм/с) при приложенном напряжении 1,06 В и частоте около 1 кГц.

## 2. Сравнительный анализ насосов на ионном переносе

В таблице 1 сведены данные по рассмотренным насосам:  $Q$  — объемная скорость,  $u$  — линейная скорость,  $N$  — потребляемая мощность,  $\Delta p$  — давление,  $h \times w \times l$  — соответственно, высота, ширина и длина рабочего тела,  $x$  — характерный размер. Для удобства сравнения основных характеристик микронасосов между собой были введены две вспомогательные величины: приведенное давление  $\beta = \frac{\Delta p}{x}$  и удельная скорость

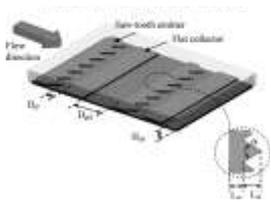
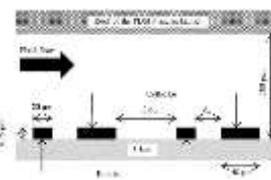
$\xi = \frac{Q}{hwl}$ . Также если не приведены данные по объемной скорости, то она рассчитывалась из линейной как  $Q = uhw$ .

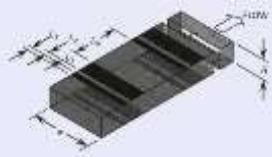
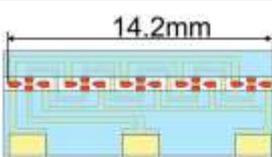
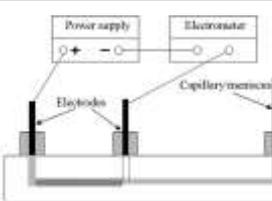
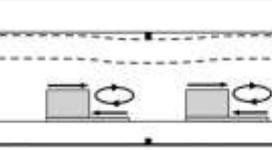
Сокращения: ИНЖ-инжекционный, КНД — кондукционный, ИНД — индукционный, ЭКЖ — на электроконъюгированных жидкостях, ЭОС — электроосмотический.

Для более наглядного сравнения величин из табл. 1 приведена диаграмма приведенного давления и удельной объемной скорости на рис. 1. Номер на графике совпадает с порядковым номером в табл. 1.

Таблица 1

### Сравнительные характеристики эффективности насосов

	$Q/u$ , мл мин <sup>-1</sup>	$N$ , мВт т	$\Delta p$ , атм	$h \times w \times l$ (x), мм	$\beta$ , атм/ м	$\xi$ , с <sup>-1</sup>	Схема
1.ИН Ж [1]	12,0	3,6	0,000 3	0.26×14,0×16.2 8 (16.28)	0,018	3,375	
2.ИН Ж [2]	0,1	16,0	0.023	0.1×5,0×42,0 (42,0)	0,54	0,079	

3.ИНД [3]	$4,32 \times 10^{-5}$	13,0	-	$0,06 \times 0,1 \times 1,5$ (1,5)	-	0,08	
4.КНД [4]	1,0	38,0	0.002	$0.254 \times 12.7 \times 11,0$ (12.7)	0.155	0,47	
5.КНД [5]	12,0	45,0	0.009	$0.5 \times 12.7 \times 25,0$ (25)	0.355	1,26	
6.ЭКЖ [8]	4,91	-	0.13	$0.48 \times 0,7 \times 14,2$ (14.2)	9.155	17.17	
7.ЭОС , $I = \text{const}$ [9]	$8,5 \times 10^{-5}$	3,5	25,0	$0.062 \times 0.16 \times 30,0$ (30)	833,33	0,0048	
8.ЭОС , $I = \text{alt}$ [10]	$8 \times 10^{-5}$	5,0	0,013	$0.025 \times 0.1 \times 90.18$ (90.18)	0,142	0,0059	

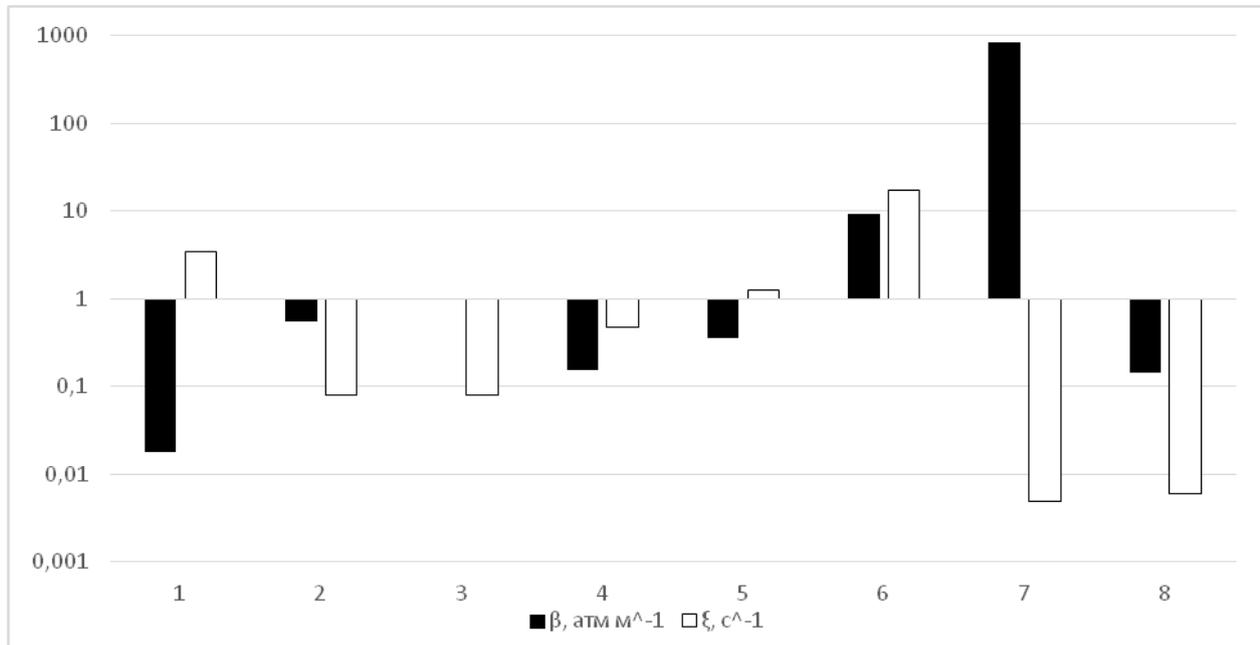


Рис 1. Сравнение приведенных давлений и удельных скоростей.

Среди рассмотренных насосов наибольшую удельную объемную скорость генерируют инъекционный насос и насос на основе электроконъюгированных жидкостей. Однако в данных видах насосов, а также и в индукционном и кондукционном насосах в основном используются хладагенты, то биомедицинское применение для них ограничено. Высокие же объемные скорости дают возможность быстро подводить и отводить жидкость от охлаждаемого объекта [1], а также способствуют применению их в жидкостных эластичных приводах [11].

Из рассмотренных микронасосов наибольшим приведенным давлением обладает электроосмотический насос постоянного тока [9], что способствует продвижению жидкостей на сравнительно большие расстояния. Также в электроосмотических микронасосах обычно применяются водные буферные растворы, что способствует более широкому биомедицинскому применению. ЭОС на основе переменного тока обладают существенным преимуществом снижения рабочего напряжения, однако они развивают недостаточно высокую скорость потока, *и*.

### Список литературы

1. Foroughi, P., Experimental Characterization of an Electrohydrodynamic Micropump for Cryogenic Spot Cooling Applications.
2. Russel, M. K., Electrohydrodynamic Injection Micropump With Composite Gold and Single-Walled Carbon Nanotube Electrodes.
3. Stubbe, M., A new working principle for ac electro-hydrodynamic on-chip micro-pumps.
4. Pearson, M. R., Experimental study of EHD conduction pumping at the meso- and micro-scale.
5. Pearson, M. R., Electrohydrodynamic Conduction Driven Single- and Two-Phase Flow in Microchannels With Heat Transfer.
6. Kim, J.-w., Comprehending electro-conjugate fluid (ECF) jets by using the Onsager effect.
7. Raghavan, R., Electrokinetic Actuation of Low Conductivity Dielectric Liquids.
8. Matsubara T., Development of MEMS-fabricated bidirectional ECF (electro-conjugate fluid) micropumps.
9. Borowsky, J., High pressure electroosmotic pump based on a packed bed planar microchip.
10. Huang, C.-C., Ultrafast high-pressure AC electro-osmotic pumps for portable biomedical microfluidics.
11. Ueno, S., Micro inchworm robot using electro-conjugate fluid.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МИНИАТЮРНОЙ ПОРТАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОАНАЛИТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЛКОВЫХ СТРУКТУР

О.А. СМИРНОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе исследуются электрические свойства белковых структур с помощью миниатюрно. Белки являются композитными средами, следовательно, проводящие свойства могут совпасть со свойствами пассивного компонента электрических цепей — резистора. Целью работы является сравнение вольтамперограмм резистора и растворов белков различной концентрации.

**Ключевые слова:** белки, электроды, разработанная миниатюрная портативная электроаналитическая платформа, БСА, циклическая вольтамперометрия, вольтамперограмма.

## **Введение**

Исследования свойств молекулярных белковых маркеров заболеваний являются актуальными для их своевременной диагностики и предупреждения. Так, например, для диагностики инфаркта миокарда используют сердечный тропонин (сTn) и миоглобин, креатинфосфокиназу и СРБ (С-реактивный белок). Традиционные лабораторные средства диагностики, как правило, являются трудоёмкими, времязатратными, требуют высококвалифицированного оператора и могут использоваться исключительно в специализированных лабораториях. Поэтому существует необходимость в разработке миниатюрных и портативных устройств для экспресс-диагностики белковых маркеров заболеваний.

Белки представляют собой высокомолекулярные органические вещества, состоящие из остатков  $\alpha$ -аминокислот, соединённых пептидными связями -CO-NH-. Для большинства природных белков изоэлектрическая точка располагается в слабокислой среде при  $pH=4,85,4$ . Белки являются сложными композитными структурами, для анализа которых нашли широкое применение электрохимические методы. Поэтому целью данной работы является исследование электрических свойств белковых структур с помощью разработанной миниатюрной портативной электроаналитической платформы.

## **Материалы и методы**

Объектами исследования являлись: резистор (пассивный компонент электрической цепи) номиналом 100 кОм, который использовался для установления калибровочных зависимостей; растворы БСА в 0,005% дигидрофосфата натрия различной концентрации. Эксперимент проводился на разработанной миниатюрной портативной электроаналитической платформе (рисунок 1а), в основе работы которой стоит микроконтроллерная платформа Arduino Uno, с помощью трёхэлектродной углеродной системы (рисунок 1б), состоящий из рабочего (РЭ) и вспомогательного (ВЭ) электродов и электрода сравнения (ЭС). Все окислительно-восстановительные реакции происходят на поверхности РЭ, поэтому он должен иметь большую площадь поверхности для обеспечения процессов поляризации, происходящих из-за увеличения плотности тока, проходящего через электролитическую ячейку. Опорное напряжение обеспечивает ЭС, площадь поверхности которого должна быть во много раз больше площади поверхности РЭ, чтобы считать ЭС неполяризованным, а следовательно, не изменяющим свой

потенциал. Для обеспечения протекания электрического тока через электролитическую ячейку используется ВЭ.

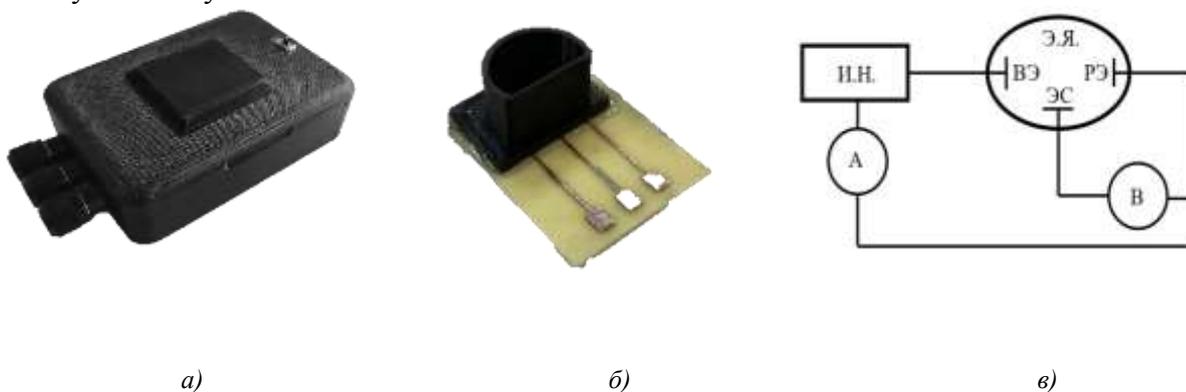


Рис. 1. Разработанная портативная электроаналитическая платформа  
(а) с электродами (б) и её принципиальная схема (в).

Исследования электрических свойств белков проводились с помощью циклической вольтамперометрии, которая представляет собой электрохимический метод исследования зависимости тока в электролитической ячейке от протекающего через неё потенциала. При этом развёртка потенциала в прямом и обратном направлениях проводится с одинаковой скоростью.

Электроды изготовлены методом механического растирания графита по поверхности меди на подложке стеклотекстолита. Топология электродов получена фотолитографическим методом на основе сухого негативного плёночного фоторезиста. Травления меди проводилось в смеси перекиси водорода, лимонной кислоты и хлорида натрия в соотношении 100:30:3.

### Результаты

На начальном этапе получена вольтамперограмма резистора с номиналом 100 кОм (рис. 3) с целью построения калибровочной кривой. Погрешность измерений прибора около 1%.

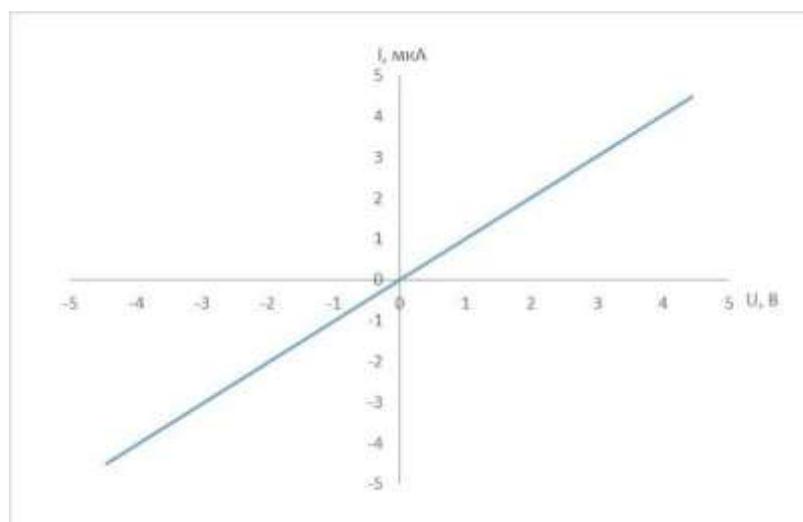


Рис. 3. Вольтамперограмма резистора номиналом 100 кОм.

Далее проведены измерения растворов БСА в 0,005% дигидрофосфата натрия различной концентрации. Вольтамперограммы представлены на рисунке 4.

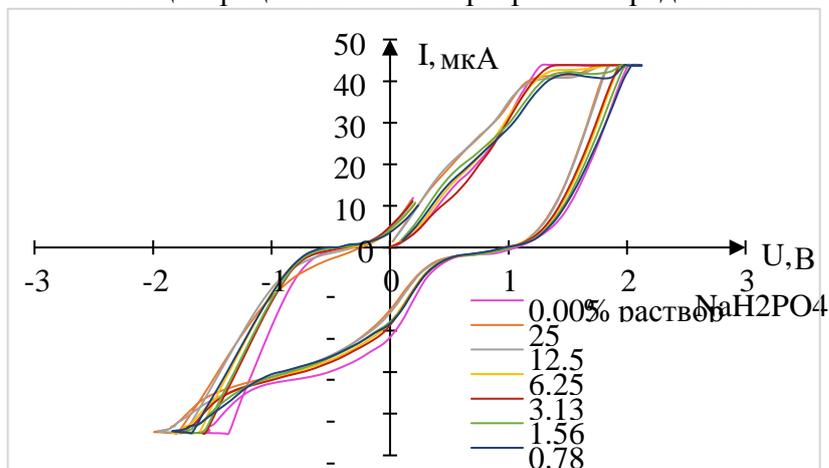


Рис. 4. Вольтамперограммы растворов БСА в 0,005%  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$

#### **Заключение.**

В работе исследована работоспособность разработанной миниатюрной портативной электроаналитической платформы на примере растворов БСА в 0,005% дигидрофосфата натрия различной концентрации. Построены вольтамперограммы, которые позволяют убедиться в том, что регистрирующее устройство функционирует должным образом и позволяет проводить экспресс-оценку их концентрации в биологической пробе. Измерения коррелируют с литературными данными<sup>[1]</sup>.

#### **Список литературы**

1. Шедченко И.В. Разработка портативной электроаналитической платформы для биологического экспресс-анализа.
2. Арляпов В.А., Харьковская А.С., Абрамова Т.Н., Кузнецова Л.С., Илюхина А.С., Зайцев М.Г., Малучин А.В., Решетиллов А.Н. Гибридный редокс-активный полимер на основе бычьего сывороточного альбумина, ферроцена, карбоксилированных углеродных нанотрубок и глюкозооксидазы<sup>[1]</sup>.
3. Нгуен Суан НГИА. Диэлектрическая релаксация надмолекулярных структур в биологических жидкостях на низких и инфранизких частотах.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНА С ДОБАВЛЕНИЕМ СОЕДИНЕНИЙ КОБАЛЬТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ**

Е.М. СОКОЛОВА, А.А. ПОНОМАРЕВА

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»*

**Аннотация.** Работа посвящена созданию прочного поглощающего покрытия на основе силикатной матрицы с включениями в нее частиц оксида кобальта для использования в лазерной хирургии. Предложен состав полимерного покрытия кварцевого волновода лазера, в качестве основы для создания силикатной матрицы выбрал тетраэтоксисилан, а поглощающие свойства покрытию придает оксид кобальта. Разработана методика синтеза покрытия и изучены свойства пленок на способность к поглощению лазерного излучения ближнего ИК-спектра.

**Ключевые слова:** *силикатная матрица, оксид кобальта, поглощающее покрытие, лазер.*

### **Введение**

Лазерные технологии широко используются в медицинской практике еще с 60-х годов XX века, и на сегодняшний день эта область является одной из самых быстро развивающихся. Свойства лазеров позволяют совершать хирургические и терапевтические вмешательства локально благодаря тому, что ткани и жидкости в организме человека избирательно поглощают лазерное излучение.

Особенности лазерного нагрева жидкостей широко исследуются практически сразу с момента появления первых лазерных генераторов. В хирургии широко используют способность лазерного излучения распространяться через оптоволокно, которое удобно вводить в биологическую ткань через пункционные иглы. Относительно новым направлением в хирургии является использование сгенерированных струй, которые выполняют роль «микрорезцов» [1]. Происходит это из-за того, что контакт торца оптоволоконного с биологической жидкостью приводит к её локальному нагреву и вскипанию. Для того, чтобы вскипание жидкости происходило более эффективно необходимо наносить на торец оптоволоконного поглощающее покрытие, которое будет обладать высокой адгезией к кварцу.

Известно, что растворные методы синтеза являются универсальными технологиями, позволяющими получать порошки и тонкие плёнки, а также покрывать сложные объекты с образованием композиционных материалов с малыми размерами конденсированных фаз и повышенной стабильности.

В данной работе представлена методика создания поглощающего покрытия на основе тетраэтоксисилана (ТЭОС) с добавлением частиц оксида кобальта. ТЭОС широко применяется для синтеза термически стабильных покрытий от лазерного излучения [2] и в качестве отверждающего компонента различных композиционных материалов. Кобальт является полезным макроэлементом и входит в состав витамина В12. Исходя из этого, он выступает как безвредный компонент поглощающего покрытия.

Таким образом, целью данной работы является создание прочного и безопасного покрытия для волноводов лазеров, применяемых в качестве хирургических «микрорезцов».

### **Экспериментальная часть.**

Методы синтеза кремниевой матрицы на основе ТЭОС широко применяются в настоящее время [2-4]. Все способы основываются на постадийной реакции гидролитической поликонденсации ТЭОС и последующей температурной обработке покрытия при 100-200°C. Гидролиз может проходить при различных значениях pH и от этого будет зависеть конечная структура силикатной матрицы, также использование кислотных и щелочных катализаторов ускоряет время образования матрицы.

В данной работе, для синтеза силикатной матрицы не использовались катализаторы, для получения более чистого состава покрытия. Для этого в этиловом спирте растворяли

$\text{CoCl}_2$  и добавляли к нему ТЭОС. Спустя сутки наносили полученный раствор на кварцевое стекло и нагревали при температуре  $150^\circ\text{C}$ . Процесс повторялся 3 раза для получения более плотного покрытия. Общая схема методики создания покрытия представлена на рис. 1.

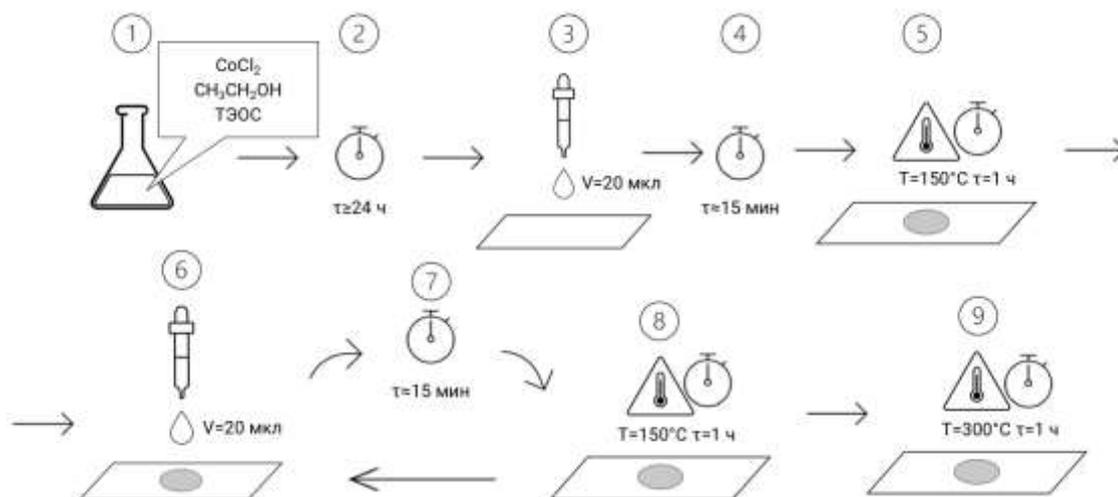


Рис. 1 Схема методики синтеза полимерного покрытия на основе ТЭОС.

Так как соли кобальта в зависимости от строения гидратированного иона обладают розовым или синим цветом, то для получения черного покрытия полученные пленки обжигались в течение 1 часа при температуре  $300^\circ\text{C}$ . Такой термической обработки достаточно для разрушения соли и образования черного смешанного оксида кобальта  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

### Результаты и обсуждение

Полученные покрытия проверялись механически на прочность. В результате были выбраны оптимальные молярные соотношения ионов кобальта и ТЭОС для синтеза прочного покрытия: с молярной долей 0,85, 0,75 и 0,7.

Анализ ИК-спектров полученных покрытий после обжига в муфельной печи при  $300^\circ\text{C}$  показал пик при  $660\text{ см}^{-1}$ , который соответствует валентным колебаниям связи металл кислород  $\text{Co(III)-O}$ . Это подтверждает наличие частиц  $\text{Co}_3\text{O}_4$  внутри кремниевой матрицы.

Выбранные образцы были подвергнуты лазерному излучению мощностью 800 Вт и длиной волны 980 нм. Лазер помещался на расстоянии 11 см от покрытия. Отслеживание поглощающей способности покрытия производилось при помощи регистрации температуры покрытия через тепловизионную камеру.

Исследованы 3 покрытия, и максимальная температура нагрева при воздействии лазером на протяжении 15 минут составила  $32,7^\circ\text{C}$  для покрытия с молярной долей ионов  $\text{Co}^{2+}$  0,85 (рис. 2).

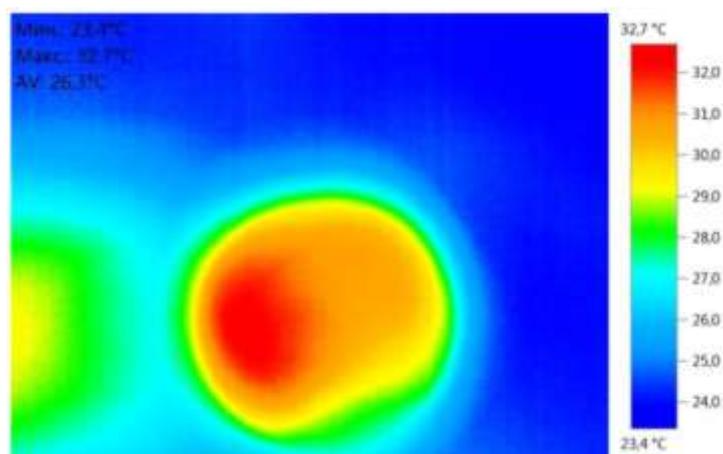


Рис. 2. Изображение покрытия с телевизионной камеры при воздействии лазерным излучением.

Анализ строения силикатной матрицы полученных покрытий с помощью оптического микроскопа позволил рассмотреть детально образующиеся кластеры. Наиболее удачный снимок получен для покрытия с мольной долей ионов  $\text{Co}^{2+}$  равной 0,7 (рис. 3).

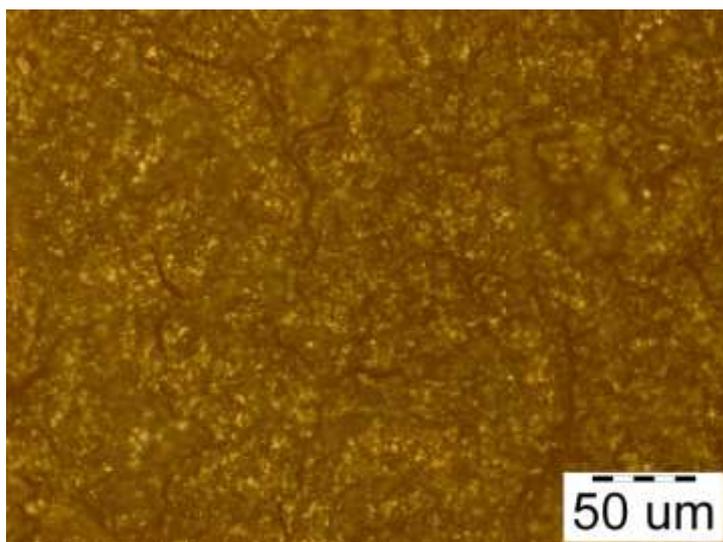


Рис. 3 Структура полученного покрытия с мольной долей ионов  $\text{Co}^{2+}$  0,7.

Как видно из рисунка 3, синтез покрытия на основе силикатной матрицы из ТЭОС, позволяет получить покрытие с равномерным заполнением пор оксидом кобальта. На рис. 3 отсутствуют большие проплешины в матрице полимера.

### **Вывод**

В работе описана актуальность создания покрытия для использования в лазерной хирургии. Показано, что ТЭОС является хорошим источником кремния для синтеза прочной силикатной матрицы, в которую могут встраиваться небольшие частицы.

В ходе работы были исследованы полимерные покрытия с различным мольным содержанием ТЭОС и ионов  $\text{Co}^{2+}$  при выбранной методике. Проведен анализ способности покрытий к нагреванию при воздействии на него лазерным излучением длиной волны 980 нм. В дальнейшем планируется создание методики для нанесения этих составов на поверхность торца кварцевого волновода и исследование адгезии полученных покрытий.

### Список литературы

1. Чудновский В. М. и др. Лазероиндуцированное кипение биологических жидкостей в медицинских технологиях //Квантовая электроника. — 2017. — Т. 47. — №. 4. — С. 361-370.
2. Еськин С. В. и др. Способ получения стекла с антиотражающим мезопористым покрытием на основе наночастиц SiO<sub>2</sub>. — 2014.
3. Zhang Q. H. et al. Comparative study on cracking behavior of sol-gel silica antireflective coating for high-powered laser system //Engineering Failure Analysis. — 2017. — Т. 82. — С. 64-71.
4. Stoaia M. et al. Low temperature synthesis of Co<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> nanocomposite using a modified sol-gel method //Journal of sol-gel science and technology. — 2010. — Т. 54. — №. 1. — С. 49-56.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СПОРТЕ. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ANYLODGC

А.Д. ТРОШЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Рассматривается процесс продуцирования композиций спортивной аэробики в ракурсе систем массового обслуживания и инструмент AnyLodgic/

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, спортивная аэробика, AnyLodgic, агентное моделирование

### **Некоторые аспекты создания модели процесса продуцирования композиций спортивной аэробики в конкретно взятом действующем проекте**

Современные средства моделирования охватывают все подходы. К инструментам, позволяющим качественно построить имитационные модели, относят: MATLAB Simulink, AnyLodgic и другие, которые можно найти и в свободном доступе, условно свободном доступе. AnyLogic позволяет описывать разные части больших гетерогенных систем (например, рынок и цепочка поставок, подготовка композиций спортивной аэробики), используя разные подходы. Почему имитационное моделирование? Несмотря на недостатки имитационного моделирования, например, что для широкого применения моделью можно воспользоваться лишь при детальном описании её построения, разработанные на основе ИМ(имитационного моделирования) системы поддержки принятия решений внедрены в России в крупнейших компаниях в области логистики, металлургии, сотовой связи, пищевой промышленности, в нефтегазовой отрасли[1].

**Цель работы:** данная работа призвана лишь абстрактно показать возможность одного из мощнейших отечественных программных обеспечений в применении к сфере спорта, а именно к подготовке композиции спортивной аэробики. Система массового обслуживания — это абстрактный объект, в котором выполняется последовательность операций (здесь -прогонов композиций), включает совокупность приборов обслуживания, которые связаны определенны логическим образом. В соответствии с этой логикой происходит движение материальных носителей — заявок на обслуживание от канала к каналу [2]. Для начала, представим некоторые аспекты создания модели процесса продуцирования композиций спортивной аэробики в конкретно взятом действующем проекте.

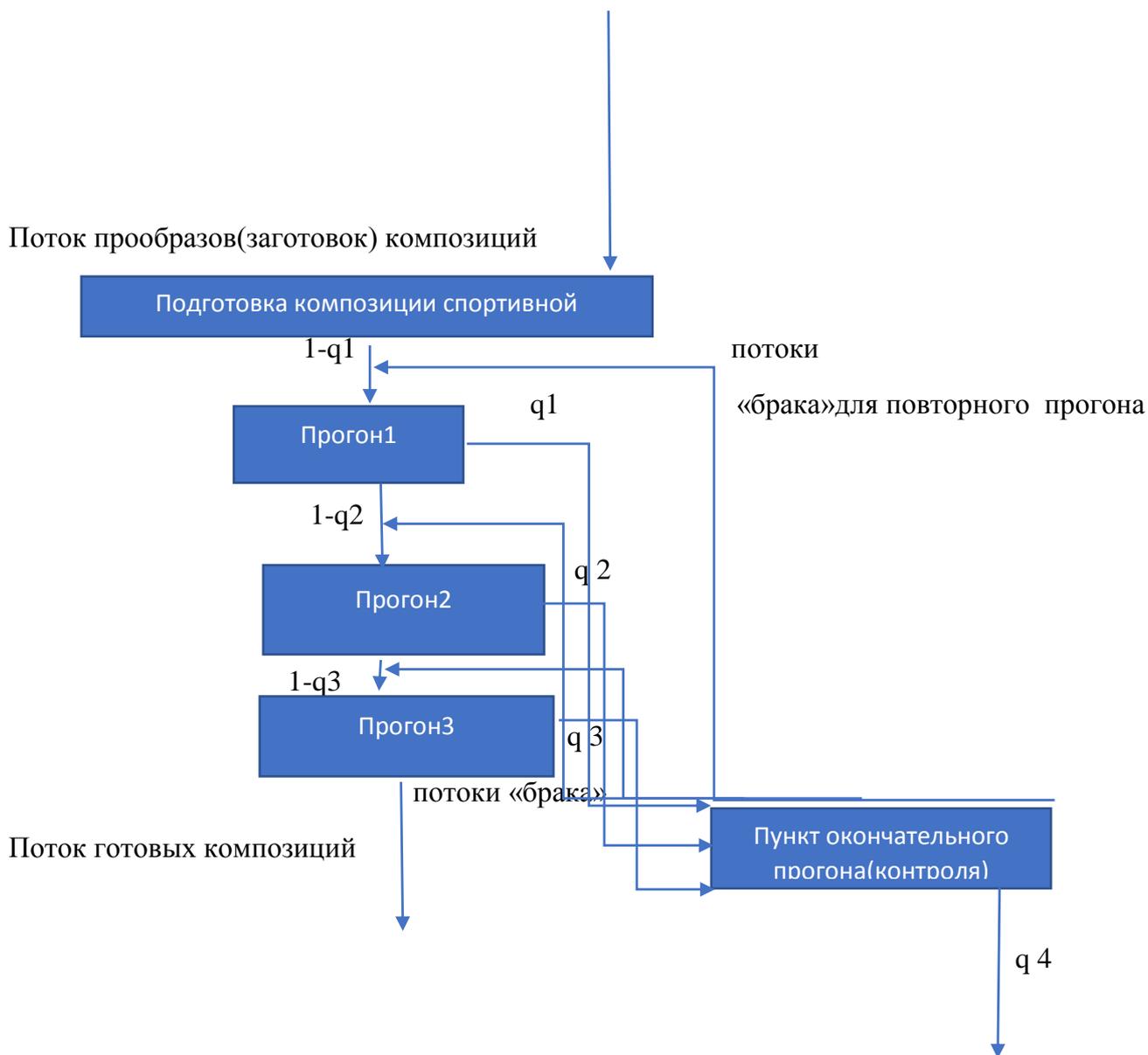


Рис. 1. Процесс подготовки композиций в спортивной аэробике как система массового обслуживания с ожиданием.

Спортивная аэробика — вид спорта, официально зарегистрированный во Всероссийском реестре видов спорта. Можно сказать, что это вид гимнастики, в котором спортсмены, под соответствующее музыкальное сопровождение, выполняют непрерывный сложный комплекс упражнений, представляющий собой композицию спортивной аэробики, имеющую определённую длительность по времени, содержащую элементы гибкости, статической силы, динамической силы, прыжки...очень красивый и зрелищный вид спорта.

Пусть продуцирование композиций спортивной аэробики начинается через случайные промежутки времени  $T_{\text{прод}}$ . Выполнению операций продуцирование предшествует спортивная подготовка. Длительность подготовки зависит прежде всего от качества подготовки спортсменов, подопечных (конечно, от многих факторов, допущение

примечание автора). Всего различных видов заготовок композиций  $n1$ . Из опыта проекта берём частоту продуцирования композиций и среднее значение времени их подготовки.

Таблица 1

**Частота продуцирования композиций и среднее значение времени их подготовки**

Час тота	Число вое значение		...		Числ овое значе ние
Среднее время	Числовое значение		...		Числовое значение

Для продуцирования композиции спортивной аэробики последовательно выполняется  $n$  прогонов композиций(операций) со средними временами  $T1, T2... Tn$ . После каждого прогона в течение времени  $Toц1 Toц2 ...T oц n$  следует оценка(контроль). Время выполнения прогонов композиций(операций) и оценки (контроля невыгодных композиций) — случайное. Контроль не проходят, бракуются  $q 1, q 2... qn$  % композиций соответственно.

Забракованные композиции могут слегка видоизменяться. Пусть только когда повторно композиция не пройдёт контроль, она будет отнесена окончательно к невыгодным, к «браку». То есть, есть пункт окончательного прогона, невозврата, где композиция проходит проверку в течении какого — то времени(например, распределённого по экспоненциальному закону со средним значением  $Tкон.$ , после чего  $q(n+1)$  % композиций относят к браку, а  $(1 - q(n+1))$  % подлежат повторному выполнению прогонов композиций, после которых не прошли контроль невыгодных композиций.

Модель должна позволять определять относительное количество успешных и невыгодных композиций, среднее время продуцирования(изготовления) одной композиции.

Результаты моделирования необходимо получить с точностью  $\epsilon$  и доверительной вероятностью  $\alpha$ .

Представим процесс подготовки композиций в спортивной аэробике как систему массового обслуживания с ожиданием (рис. 1).

AnyLogic-модель процесса продуцирования композиций спортивной аэробики в конкретном проекте.

Согласно представлению процесса подготовки композиций в спортивной аэробике как системы массового обслуживания с ожиданием модель должна включать следующие сегменты:

- исходные данные;
- подготовка композиции спортивной аэробики;
- прогон 1;
- прогон 2;
- прогон3;
- пункт окончательного прогона(контроля);
- хранилище (вместо база данных) готовых композиций;
- хранилище (вместо база данных) бракованных деталей.
- результаты моделирования.

Что будет имитационным моделированием для такого процесса в образе системы массового обслуживания?

Имитационная модель будет представлять собой симуляцию подготовки композиции спортивной аэробики, с наиболее «выигрышным» результатом.

Модель призвана помочь проанализировать зависимость между параметрами качества управления подготовкой композиции, временем продуцирования композиции. Однако, что считать каналом обслуживания, как отнестись при моделировании реального процесса подготовки композиции к данному параметру-всё зависит, включим ли мы данную имитационную модель в разрабатываемую биотехническую систему в перспективе. При запуске приложения AnyLogic пользователю предлагается создать новую модель (рис. 2).



Рис. 2. Вид при запуске приложения Anylogic/

АМ (агентное моделирование) может применяться практически на любом уровне и в любых масштабах. Агенты могут представлять пешеходов, автомобили или роботов в физическом пространстве, клиента или продавца на среднем уровне, спортсмена в условиях подготовки. Далее, щёлкнув вкладку «Проект» как раз видно, что AnyLogic осуществляет агентное моделирование. Интересно, что пользователь не обязательно должен быть программистом в «Java».

Что бы моделировать в AnyLogic достаточно определиться с исходными данными, задать режим реального времени, задать блок -схему : согласно рисунку 1: объект Source будет моделировать приход потока композиций, объект queue будет моделировать поток композиций, ожидающих прогона, delay- задержку, обычно время на выполнение какой либо операции (прогон, отправка на повторный прогон), sink -конец( поток окончательно забракованных композиций) и клавишей «запустить» запускаем модель (рис.3).

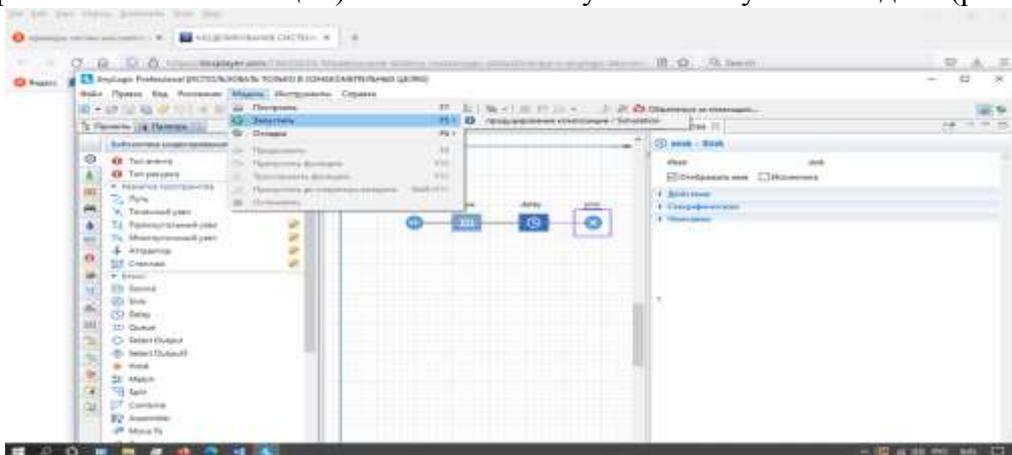


Рис. 3. Вид окна AnyLogic при запуске модели.

На вкладке «Модельное время» можно: задать режим моделирования (модель выполняется с привязкой, без привязки к физическому времени) Возможно подключить дополнительный функционал (например, анализ входных и выходных данных, оптимизацию)

Необходимо отметить, что оптимизатор OptQuest запускается прямо из среды разработки модели.

### Список литературы

1. Хромов-Борисов, С. [Электронный ресурс] Инструменты стратегического менеджмента. Top-Manager, 2008. URL: <https://www.anylogic.ru/upload/iblock/735/7350365c8338af0d770304874ac9c9cae.pdf> (дата обращения: 20.04.22)
2. Системы массового обслуживания [Электронный ресурс] //Студопедия. URL: [https://www.studopedia.ru /15\\_63056\\_sistemi-massovogo-obsluzhivaniya.html?](https://www.studopedia.ru /15_63056_sistemi-massovogo-obsluzhivaniya.html?) (дата обращения: 20.04.22)

## СЕКЦИЯ ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

### ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЦЕТОНА В КАЧЕСТВЕ ЭКСТРАГЕНТА В БИОТЕСТОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

М. И. СЕМЕНОВА, Ю.А. ГУДЫРЁВА, Е.А. АСТАШКОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Солнечные панели являются относительно новыми и мало изученными устройствами. На сегодняшний день, химическая инертность и токсичность полимерных веществ, которые являются неотъемлемой частью панелей, не изучены. В статье рассматриваются исследования по определению индекса токсичности полимерных компонентов отработанных поликристаллических солнечных панелей с использованием ацетона в качестве экстрагента на этапе предподготовки. Результаты эксперимента позволяют определить уровень опасности компонентов для окружающей среды, а также оценить возможность применения отличных от дистиллированной воды экстрагентов.

**Ключевые слова:** *альтернативные источники энергии, поликристаллические солнечные панели, отходы, токсичность, биотестирование, индекс токсичности, предподготовка.*

Солнечная энергия — один из наиболее популярных видов альтернативной энергетики на сегодняшний день. В 2019 году с помощью солнечных панелей было получено 2,7% мировой электроэнергии. И можно полагать, данная цифра будет только расти со временем, так как все больше стран отдает предпочтение возобновляемым источникам энергии. Более того, Великобритания предполагает отказаться от газа к 2035 году.

Поскольку солнечные панели вошли в эксплуатацию относительно недавно, то многие страны еще не располагают развитой системой их утилизации. Для 90% всех солнечных панелей последней стадией жизни становится захоронение на полигонах. А ведь некоторые составляющие, такие как фотогальванический элемент, рама, могут быть использованы повторно [1-2].

Помимо главного фотогальванического элемента и стекла, в состав кристаллических солнечных панелей входят полимерные материалы EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид), токсичность и химическая инертность которых еще не изучены.

Данные вещества относятся к органическим полимерам, плохо растворимым в воде, что обуславливает возникающие трудности при определении токсичности данных материалов методом биотестирования. Биотестовый анализ или биотестирования — это метод интегральной оценки суммарной токсичности среды на основании биологической реакции живых организмов. Получение объективных и достоверных результатов биотестирования зависит от множества факторов реализации биотестов: свойств тестируемой среды, особенностей выбранных тест-организмов и оцениваемых тест-функций, условий и алгоритмов проведения экспериментов [3].

Чаще всего аккредитованные методики подразумевает пробоподготовку с использованием дистиллированной воды в качестве экстрагента. Но при исследовании полимерных материалов данная процедура не всегда однозначно определяет картину воздействия рассматриваемого объекта на окружающую среду и живые организмы, т.к. большинство органических полимеров практически не взаимодействуют с водой, а, значит, требуется значительно увеличивать время эксперимента.

**Целью данной работы** является определение индекса токсичности полимерных компонентов отработанных поликристаллических солнечных панелей с использованием ацетона в качестве экстрагента на этапе пробоподготовки.

В качестве объекта исследования были выбраны компоненты кристаллической солнечной панели: полимерные материалы EVA (этиленвинлацетат) и Tedlar® (поливинилфторид).

В качестве тест-организмов были выбраны *Paramecium caudatum*, для которых характерен хемотаксис — двигательная реакция микроорганизмов на химический раздражитель. Выбранный тест — организм помещается в кювету вместе с исследуемой пробой согласно алгоритму, описанному в методике [4]. Скопление *Paramecium caudatum* в верхней зоне кюветы свидетельствует об отсутствии токсических веществ в анализируемой пробе. Путем вычисления соотношения числа клеток инфузорий, содержащихся в контрольной и анализируемой пробах, получается количественная оценка параметра тест-реакции, которая характеризует токсическое действие. Данная величина носит название индекс токсичности (Т) и является безразмерной.

$$T = \frac{|I_{\text{ср.к}} - I_{\text{ср.а}}|}{I_{\text{ср.к}}} \cdot K(1)$$

Где  $I_{\text{ср.к}}$  — среднее показание прибора для контрольной пробы,  $I_{\text{ср.а}}$  — среднее показание прибора для поверяемой пробы,  $K$  — коэффициент разбавления пробы. В соответствии с методикой [3], пробы делятся на 3 группы токсичности в зависимости от значения индекса токсичности: I. допустимая степень токсичности ( $0,00 < T \leq 0,40$ ); II. умеренная степень токсичности ( $0,40 < T \leq 0,70$ ); III. высокая степень токсичности ( $T > 0,70$ ).

Согласно [4] пробоподготовка отходов должна состоять из следующих этапов:

к 1 части отходов добавляют 10 частей дистиллированной воды.

экстрагирование в течение 2-х часов на аппарате для встряхивания жидкости.

после 30-минутного отстаивания надосадочная жидкость фильтруется через бумажный фильтр.

Полученный экстракт помещается в кювету с инфузориями для дальнейшего исследования.

Проведенные ранее исследования [5] показали, что индекс токсичности полимерных материалов EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид) при указанной пробоподготовке не превышает порогового значения. Но при более длительном времени экстрагирования наблюдается увеличение токсичности, а именно, превышает допустимая степень параметра Т, что свидетельствует о возможных негативных последствиях на окружающую среду в результате длительного пребывания исследуемых материалов в воде. Поэтому для сокращения времени эксперимента был выбран ацетон в качестве экстрагента (все остальные этапы пробоподготовки остались такими же). Ацетон является полярным растворителем, а также при литературном обзоре было зафиксировано использование 1% раствора данного химического вещества для проверки выживаемости инфузорий [6]. При данной концентрации альгологически чистые *Paramecium caudatum* способны выживать в течение часа, что является достаточным для проведения эксперимента.

Для исключения влияния ацетона на показатель токсичности были проведены дополнительные исследования, где в качестве контрольных кювет были использованы кюветы, приготовленные согласно [4], содержащие в верхней части раствор Лозино-Лозинского (среда культивирования *Paramecium caudatum*), а анализируемые образцы — раствор 1% ацетона. Далее по формуле (1) были рассчитаны индексы токсичности. Все полученные значения находились в диапазоне от 0,01 до 0,07, что свидетельствует об отсутствии подавляющего действия исследуемого экстрагента на тест-организм.

Следовательно, для определения индекса токсичности полимерных компонентов отработанных поликристаллических солнечных панелей возможно использовать 1% раствор водного раствора ацетона в качестве экстрагента на этапе пробоподготовки. Для исключения погрешности, достижения достоверности и релевантности результатов эксперимента проводились многократные измерения: все водные вытяжки проверялись на трех кюветах, с каждой из которых прибор снимал 10 значений. В эксперименте использовался Биотестер-2М. Полученные результаты представлены на диаграмме 1.

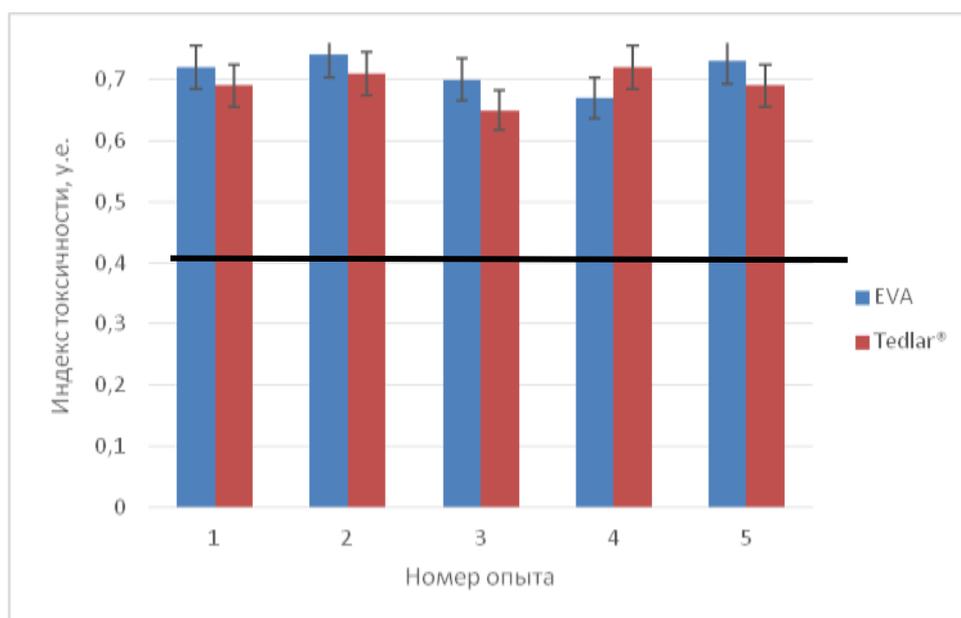


Диаграмма 1. Индекс токсичности полимерных компонентов отработанной поликристаллической солнечной панели.

Исходя из полученных значений видно, что в результате проведенных экспериментов в каждом опыте наблюдается превышение порогового значения при 2-х часовом экстрагировании в водном растворе ацетона. Для выявления образования новых соединений был проведен качественный анализ на наличие ацетат-иона, а также зафиксирована концентрация ионов водорода. Уровень pH соответствовал pH дистиллированной воды, а ацетат-ион не обнаружен ни в одном исследуемом образце. Усредненные значения индексов токсичности сведены в таблицу 1.

Таблица 1

**Усредненные индексы токсичности**

	EVA	Tedlar®
Индекс токсичности, у.е.	0,71±0,02	0,69±0,02

Таким образом, полученные результаты по определению индекса токсичности полимерных компонентов EVA и Tedlar® поликристаллических солнечных панелей с использованием ацетона в качестве экстрагента на этапе продоподготовки отражают возможность сокращения времени эксперимента при работе с полимерными компонентами. При классической пробоподготовке данные значения достигаются в результате длительной выдержке в дистиллированной воде. Также не стоит забывать, что в окружающей среде невозможно наличие воды, очищенной от растворённых в ней минеральных солей, органических веществ и других примесей, поэтому 1% раствор ацетона, выступающий в качестве экстрагента, позволяет исследовать ситуации приближенные к действительности. Проведенные исследования также доказывают, что захоронение солнечных панелей на полигонах является небезопасным способом утилизации данного вида отходов.

**Список литературы**

1. Robert M. Macnab, D.E. Koshland, Jr. The Gradient-Sensing Mechanism in Bacterial Chemotaxis, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 69, No. 9, pp. 2509-2512, September 1972
2. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review // National Renewable energy Laboratory Journal Article . — June, 2012. — №NREL/ JA-5200-51664. — pp. 32-41.
3. Чеснокова С. М., Чугай Н. В. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды : учеб. пособие. В 2 ч. Ч.2 Методы биотестирования. — Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. — 92 с
4. ПНД Ф Т 16.3.16-10 (ФР.1.39.2015Л9244). Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс — методом с применением приора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», 2015.
5. Vezhenkova, I., Semenova M., Kovalevskaya, A., Gryaznov A., Rodríguez-Barroso M.R., Jimenez Castañeda R. Chemical composition determination of impurities and effect on the toxicity degree of solar panel components, E3S Web of Conferences, 220, 01057 (2020)
6. ГОСТ 31674-2012. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения общей токсичности. Москва, Стандартинформ, 2014.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ КЛАССА ОПАСНОСТИ ОТХОДОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИВИНИЛФТОРИДА

Д.Б. БЛОХИН, Е.Г. КАЗАНИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Солнечная энергия в настоящий момент представляет собой одним из долгоживущих и возобновляемых источников энергии. Однако возникают большие проблемы обращения с отходами отработанных солнечных панелей и их компонентов, так как в процессе утилизации солнечных панелей появится огромное количество отходов, которые трудно перерабатывать. Частью отходов фотоэлектрических модулей являются органические полимеры, которые также наносят вред окружающей среде, как и другие отходы. В данной работе будет рассматриваться технология, позволяющая снизить негативное воздействие органического полимера, входящего в состав солнечных панелей — поливинилфторида — при помощи пиролиза данного компонента с использованием поглотителя.

**Ключевые слова:** источник энергии, солнечные панели, утилизация, отходы, вред окружающей среде, поливинилфторид, пиролиз, поглотитель.

В современном мире отмечается быстрое развитие солнечной энергетики. Переход к возобновляемым и долгоживущим источникам энергии становится людям выгоден с экономической точки зрения, а также с той позиции, что в процессе эксплуатации панелей не выделяются вредные выбросы, что означает, что данный источник энергии наносит меньше вред окружающей среде. Однако при утилизации солнечных панелей образуются отходы, переработка которых достаточно проблематична, а также извлечение ценных материалов приносит проблемы. В большинстве случаев те солнечные панели, срок службы которых закончился, выбрасывают на свалку. В их составе есть опасные и токсичные вещества (например, тяжелые металлы), которые могут попасть в окружающую среду (например, путем вымывания), что может привести к негативным последствиям для экосистем.

В данной работе будет рассматриваться органический полимер — поливинилфторид, который входит в состав солнечных панелей. Данный полимер является опасным отходом, при этом в нем содержатся атомы фтора, которые могут в растворе переходить во фторид-ионы, а затем образовывать фториды металлов, соединяясь с ионами металлов, которые, в свою очередь, также могут представлять опасность для состояния человека. Например, фторид натрия относится ко II классу опасности токсичности [1].

Существует много различных способов определения фторид-иона в растворе. Фотометрическое определение фторидов основано на способности фторид-иона образовывать растворимый в воде тройной комплекс сиренево-синего цвета, в состав которого входят лантан, ализаринкомплексон и фторид. Интенсивность окраски раствора фотометрируют при длине волны  $\lambda = (600 \pm 10)$  нм [2]. Потенциометрическое определение фторидов основано на прямом определении массовой концентрации фторид-ионов с использованием фторидного селективного электрода [3]. Но самым простым методом является метод осаждения с помощью соединений кальция с целью образования осадка фторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ), имеющего низкое произведение растворимости ( $4,0 \cdot 10^{-11}$ ) [4]. Также в данном методе можно использовать и соединения магния или алюминия для образования осадков фторида магния ( $\text{MgF}_2$ ) и фторида алюминия ( $\text{AlF}_3$ ), однако

их произведение растворимости будет больше, чем у фторида кальция, соответственно, сложнее выполнить условия для образования осадка.

В рамках данной статьи был выбран метод осаждения для определения фторид-ионов. В данной работе можно рассмотреть на примере осаждения с помощью соединений кальция (например, нитрат кальция  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), однако можно использовать и соединения магния или алюминия (например, нитрат магния  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  или нитрат алюминия  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ). Для проведения эксперимента необходимо было собрать установку, представленную на рисунке 1.



Рис. 1. Схема установки.

Данный опыт основан на пиролизе полимера с использованием поглотителя. С помощью газовой горелки устанавливается температура, равная или большей температуры плавления органического полимера (поливинилфторида). При данной температуре полимер начинает плавиться, а также выделяет газообразные продукты. Уравнение этой реакции можно представить в таком виде:



Далее газообразный фтор через стеклянную трубку попадает в пробирку с поглотителем (в данном примере — нитрат кальция  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), который реагирует со фтором и образует осадок — фторид кальция ( $\text{CaF}_2$ ). Уравнение данной реакции можно представить в таком виде:



Приведем результаты экспериментов.

*Первая серия опытов.* В пробирку помещался образец, в колбу было налито примерно 85 мл поглотителя — нитрата алюминия ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ). Значения представлены в Таблице 1.

Таблица 1

### Значения первой серии опытов

Масса образца m, г	Концентрация поглотителя C, моль/л
0,0552	0,005
0,0193	
0,1596	

В результате реакций наблюдалось выделение газа: пробирка с образцом мутнела, в колбе с поглотителем образовывались пузыри (так как выделяемый фтор переходил по трубке из пробирки в колбу), но осадок в колбе не выпадал. Были приведены попытки

увеличить/уменьшить температуру посредством сдвига спиртовки, но результат не изменился. В конце серии опытов напрямую в пробирку с образцом был налит поглотитель, образовался мутный раствор — реакция произошла (рис. 2).



Рис. 2. Результаты первой серии опытов.

*Вторая серия опытов.* В пробирку помещался образец, во вторую пробирку было налито примерно 20 мл поглотителя, использовался нитрат кальция ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) по причине меньшего произведения растворимости  $\text{CaF}_2$  ( $4,0 \cdot 10^{-11}$ ), в отличие от  $\text{AlF}_3$  ( $1,09 \cdot 10^{-3}$ ). Значения представлены в Таблице 2.

Таблица 2

### Значения второй серии опытов

Масса образца $m$ , г	Концентрация поглотителя $C$ , моль/л
0,0138	0,005
0,0466	
0,0552	

В результате некоторых реакций также наблюдалось выделение газа: пробирка с образцом мутнела, а в пробирке с поглотителем образовывались пузыри (так как выделяемый фтор переходил по трубке из пробирки в колбу), но аналогично осадок в пробирке с поглотителем не выпадал (рис. 3).

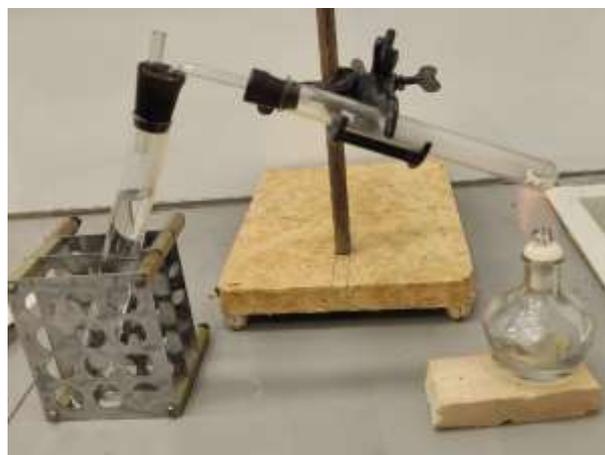


Рис. 3. Результаты второй серии опытов.

*Третья серия опытов.* В пробирку помещался образец, во вторую пробирку было налито примерно 20 мл поглотителя — нитрата кальция ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Значения представлены в Таблице 3.

Таблица 3

### Значения третьей серии опытов

Масса образца $m$ , г	Концентрация поглотителя $C$ , моль/л
0,0942	0,5
0,0688	
0,1891	

В результате некоторых реакций также наблюдалось выделение газа: пробирка с образцом мутнела, а в пробирке с поглотителем образовывались пузыри (так как выделяемый фтор переходил по трубке из пробирки в колбу), но осадок образовался на стенках пробирки с образцом лишь в одном эксперименте (рис. 4).



Рис. 4. Результаты третьей серии опытов.

Таким образом, в ходе данного эксперимента из опасного отхода (поливинилфторида) с помощью пиролиза этого компонента солнечных панелей получился менее опасный отход (фторид кальция), который представляет меньшую угрозу окружающей среде, чем рассмотренный органический полимер.

### Список литературы

1. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. — М.: Стандартинформ, 2007. — 7 с.
2. ГОСТ 4386-89. Вода питьевая. Методы определения массовой концентрации фторидов. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. — 10 с.
3. ГОСТ 23268.18-78. Воды минеральные питьевые лечебные, лечебно-столовые и природные столовые. Метод определения фторид-ионов. — 11 с.
4. Саулин Д.В. Разработка технологии утилизации фторид-иона из растворов. — «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология». — 13 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОСВЕННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ

Х.Д. БОБОЕВ

*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены погрешности косвенного метода определения параметров распределительной электрической сети относительно земли, основанного на подключении к одной из фаз дополнительной емкости. Проведенное исследование погрешностей определения параметров сети относительно земли показало, что в зависимости от несимметрии в сети и изменении величины и вида нагрузки они не превышают 8,3 %. Данный метод может быть использован в карьерных распределительных электрических сетях (КРС) с изолированной нейтралью.

**Ключевые слова:** *карьерная распределительная электрическая сеть, дополнительная емкость, параметры сети относительно земли.*

Основной причиной аварий на открытых горных работах является неудовлетворительное состояние электроустановок и сетей [1-5]. При решении вопросов повышения безопасности и надежности карьерного электроснабжения и оборудования необходимо уделять первостепенное внимание контролю изоляции как всей электросистемы, так и ее элементов [2, 6-9].

В процессе эксплуатации возникает необходимость периодического определения сопротивления изоляции фаз сети относительно земли в КРС напряжением 6 кВ. Указанные параметры можно определить либо аналитически, либо экспериментально.

В настоящее время существуют достаточно простые и точные формулы для расчета величины тока замыкания на землю и сопротивления изоляции в общепромышленных сетях с изолированной нейтралью по величине длины воздушных и кабельных линий, электрически связанных между собой.

Однако на открытых горных работах, где условия работы сетей электроснабжения значительно отличаются от условий промышленных стационарных сетей, где сопротивление изоляции относительно земли зависит в большей мере от условий окружающей среды и условий эксплуатации и где имеется большое число энергоемкого оборудования, применение этих формул дает значительные погрешности в получаемых результатах (30 %, в некоторые случаи больше) [2].

Экспериментальные измерения в сетях проводятся либо прямым, либо косвенным методами. Для прямого метода производят искусственное металлическое замыкание одной из фаз на землю, что крайне нежелательно по целому ряду причин. При металлическом замыкании на землю при переходном процессе возникают перенапряжения на здоровых фазах относительно земли. В этом случае возможен переход однофазного замыкания в двухфазное замыкание на землю в различных точках сети. На корпусах электрооборудования возникают потенциалы опасные для обслуживающего персонала, устранить которые простыми средствами не представляется возможным.

Исходя из условия обеспечения электробезопасности обслуживания, целесообразно пользоваться косвенными методами измерения. Проведенный анализ существующих методов [10-15]. показал, что в настоящее время на практике в сетях с изолированной нейтралью для определения параметров изоляции используются либо подключение дополнительной активной проводимости, либо подключение дополнительной емкости.

Недостатки при подключении активной проводимости: невозможность определения параметров изоляции сети относительно земли отдельных фаз; отсутствие доступных промышленных образцов высоковольтных активных проводимостей, пригодных для использования в установках напряжением выше 1000 В: дополнительная активная проводимость должна обладать способностью рассеивать значительную мощность (10 кВт и выше), в результате чего неизбежен значительный температурный дрейф параметров дополнительной активной проводимости, что существенно увеличит погрешность результатов измерений.

Указанные выше недостатки устраняются при использовании метода определения параметров изоляции, основанного на подключении к одной из фаз дополнительной емкости. В качестве дополнительной емкости целесообразно использовать силовые конденсаторы, применяемые в конденсаторных установках, предназначенных для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения, кроме того, изменение параметров дополнительной емкости в процессе измерений минимально.

С целью оценки влияния на точность определения параметров изоляции фаз сети относительно земли нами была разработана компьютерная модель с использованием «Matlab / Simulink» (рис.1) [16-18], а также проверена ее адекватность. Следует отметить, что основу составляет компьютерная модель и их блоки, которые подробно рассмотрены в [19, 20].

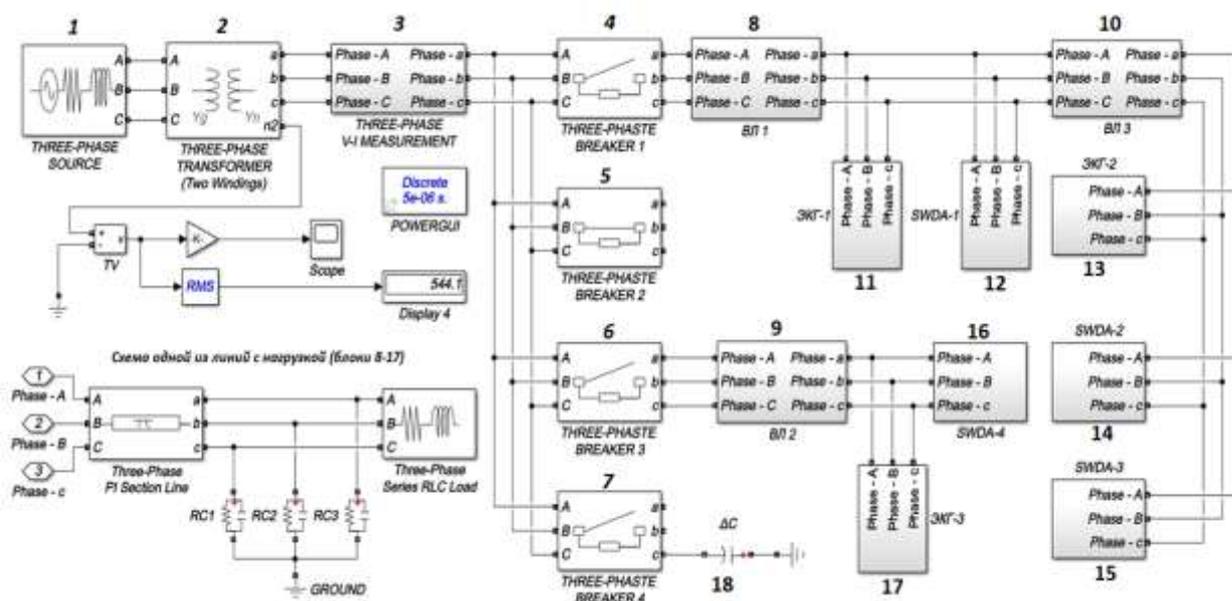
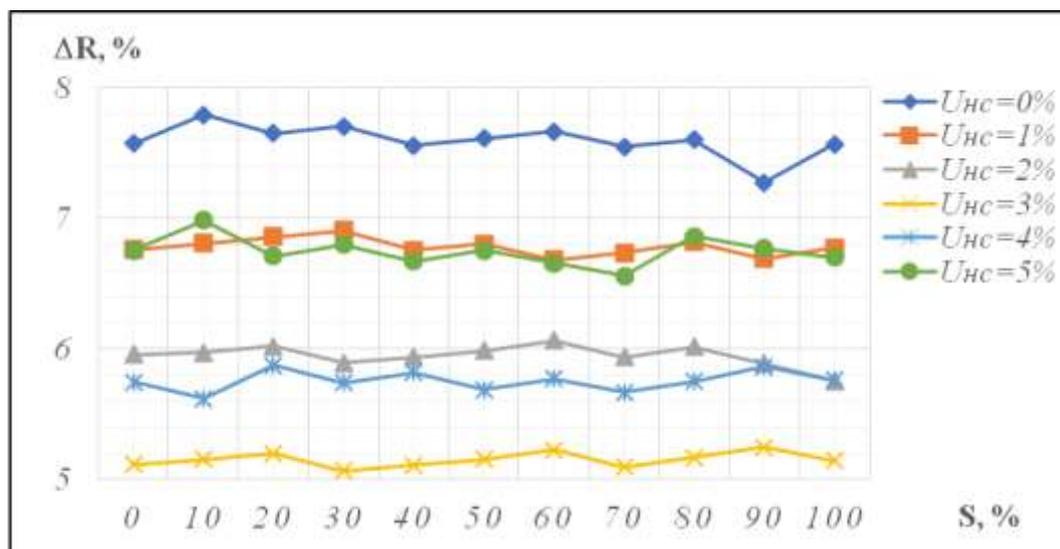


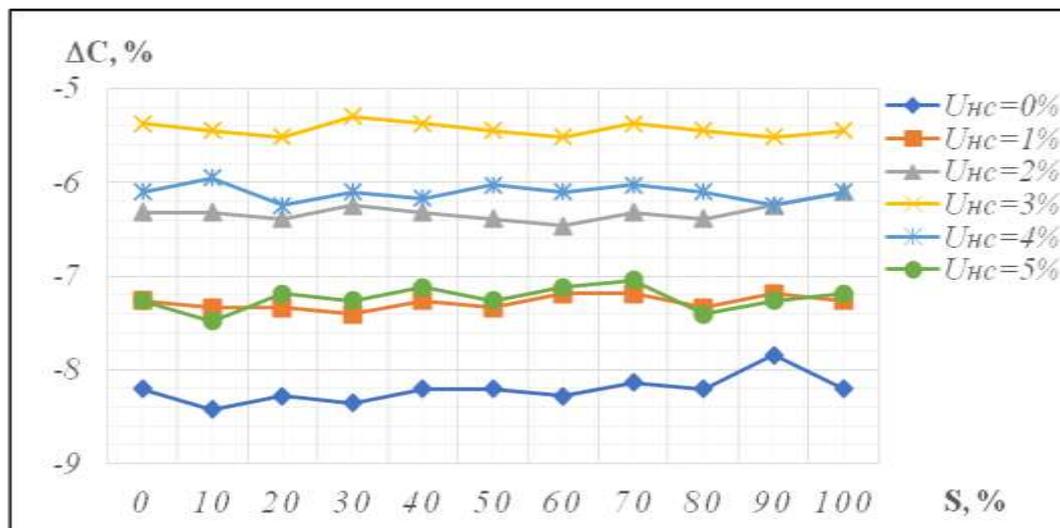
Рис.1. Общий вид разработанной компьютерной модели.

На разработанной модели проведены исследования влияния различных факторов на результаты определения параметров изоляции косвенным методом, основанном на подключении к одной из фаз дополнительной емкости.

Исследования погрешностей определения параметров изоляции фаз сети относительно земли проводились по методике, приведенной в [2]. На рис. 2 показано влияние характера и величины нагрузки при изменении ее от 0 до 100 % и несимметрии в сети от 0 до 5% на точность измерения составляющих сопротивления изоляции фаз сети относительно земли.



a)



a)

Рис.2. Зависимости погрешностей  $\Delta R$  (а) и  $\Delta C\phi$  (б) при изменении полной нагрузки от 0 до 100% и несимметрии в сети от 0 до 5%.

Исследования на разработанной компьютерной модели показали, что при несимметрии в сети, а также при изменении величин и характера нагрузки погрешность в определении параметров изоляции не превышает 8 %.

Подключение дополнительной ёмкости не приводит, практически, к перенапряжениям в сети, не создаёт опасной ситуации для персонала, а получаемые при этом данные хорошо совпадают с фактическими значениями. Выполненные исследования на компьютерной модели распределительной электрической сети с изолированной нейтралью позволили предложить методику определения параметров изоляции фаз сети относительно земли. Таким образом, с помощью данного метода можно определить суммарную емкость сети относительно земли, сопротивление изоляции фазы сети относительно земли, а также активную и ёмкостную составляющие тока однофазного замыкания на землю.

### Список литературы

1. Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацежев Ю.Г., Чеботаев Н.И. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности / — М.: Недра, 1977. — 327 с.
2. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах: Дис. докт. техн. наук: 05.26.01 / Сидоров Александр Иванович. — Челябинск, 1993. — 444 с.
3. Щуцкий В.И., Сидоров А.И., Ситчихин Ю.В., Бендяк Н.А. Электробезопасность на открытых горных работах /. — М.: Недра, 1996. — 266 с.
4. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Исследование погрешностей косвенного метода измерения параметров изоляции фаз сети относительно земли на имитационной модели // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 9. — С. 24–29.
5. Щуцкий В.И., Маврицын А.М., Сидоров А.И., Ситчихин Ю.В. Электробезопасность на открытых горных работах / — М.: Недра, 1983. — 192с
6. Бобоев Х.Д., Богданов А.В. Параметры изоляции относительно земли в карьерных распределительных сетях горнодобывающих предприятий Республики Таджикистан // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2021. — Т. 21. — № 1. — С. 29–37.
7. Лапченков К.В., Дубовой А.В., Сидоров А.И. Определение параметров изоляции относительно земли с изолированной нейтралью косвенным методом // Технологии, методы, средства: тез. докл. рег. науч.-техн. конф.. — Норильск: НИИДИ, 1996. — С.42.
8. Boboev K., Sidorov A., Davlatov A Evaluation of Indirect Methods for Determining the Isolation Parameters of the Network Phases Relative to the Ground on a Computer Model // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 556–560.
9. Бендяк Н.А., Сидоров А.И., Свигврис А.И. Определение параметров изоляции с изолированной нейтралью [Текст] / Н.А. Бендяк, // Проблемы электробезопасности в народном хозяйстве: тез. докл. научн-практ. конф. — Челябинск, 1991. — С. 18 — 19.
10. Сидоров А.И., Бендяк Н.А., Степанов С.Н. Определение параметров сетей с изолированной нейтралью относительно земли // Контроль изоляции в распределительных сетях: тез. докл. научн-практ. конф. — Челябинск, 1992. — С. 12.
11. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д., Медведева Ю.В., Саьдуллозода Ш.С. Исследование косвенных методов определения параметров изоляции на компьютерной модели // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2021. — № 1. — С. 47–54.
12. Бобоев Х.Д., Аверьянов Ю.И., Богданов А.В., Кравчук И.Л. Организация контроля изоляции в распределительной сети карьера «Тарпор» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 57–65.
13. Boboev K., Sidorov A., Khanzhina O. Determining Ground Insulation Parameters in Quarry Distribution Networks of Mining Companies in Tajikistan // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, (UralCon), 2020, pp. 344–348.
14. Бобоев, Х.Д. Анализ методов контроля изоляции в карьерных сетях напряжением 6 кВ // Техносферная безопасность в XXI веке: сборник научных трудов магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Иркутск, 26–27 ноября 2019 года. — Иркутск: ИРНТУ, 2019. — С. 234–239.
15. Бобоев Х.Д. Обзор методов и средств поддержания состояния изоляции распределительных электрических сетей // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2022. — № 1. — С. 46–50.
16. Бобоев, Х.Д. Сравнительный анализ различных методов определения параметров изоляции фаз сети относительно земли в программной среде MATLAB/Simulink // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов VI Всероссийской студенческой конференции (с международным участием): в 2 т., Челябинск, 22–23 апреля 2021 года. — Челябинск: Издательский центр Южно-Уральского государственного университета (НИУ), 2021. — С. 22–24.
17. Бобоев Х.Д. Анализ и оценка косвенных методов определения параметров изоляции сетей напряжением выше 1000 В // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2021. — № 10. — С. 46–50.
18. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Анализ методов исследования параметров изоляции электрических сетей напряжением 6 кВ // Экология. Риск. безопасность: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Курган, 29–30 октября 2020 года. — Курган: КГУ, 2020. — С. 273–275
19. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Имитационная модель карьерной распределительной сети напряжением 6 кВ // Научный поиск: материалы двенадцатой научной конференции аспирантов и докторантов, Челябинск, 17–19 марта 2020 года. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ (НИУ), 2020. — С. 18–23.

20. Сидоров А.И., Бобоев Х.Д. Компьютерная модель карьерной распределительной сети // Безопасность технологических процессов и производств: Труды III Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 26 мая 2021 года. — Екатеринбург: УГГУ, 2021. — С. 85–87.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕСТ-РЕАКЦИИ ПРОСТЕЙШИХ И БАКТЕРИЙ

А. В. ЗАБОЕВА, А. А. СИМОНЕНКО, А. С. КОВАЛЕВСКАЯ, М. И. СЕМЕНОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Пластик встречается повсеместно в современном мире, и объемы его производства только растут. Полимерные материалы окружают нас повсюду, в том числе и в быту. В окружающую среду попадает большое количество пластиковых отходов, которые имеют долгий срок разложения, и накапливаются в экосистеме, особенно много пластика в водной среде. Чтобы выяснить, какое воздействие могут оказывать отходы полимерных материалов на окружающую среду, необходимо провести анализ токсичности различных полимеров. Исследование токсичности отходов полимерных материалов производится с помощью биотестирования с использованием в качестве тест-организмов простейших и люминесцентных бактерий.

**Ключевые слова:** *оптический контроль, биотехническая система, биотестирование, токсичность, оценка токсичности среды, отходы полимерных материалов.*

Пластмассы, они же пластики — органические материалы, состоящие из высокомолекулярных соединений природного или синтетического происхождения, известных как полимеры, которые состоят из звеньев-мономеров. Это первый в мире материал по распространению и использованию из-за дешевизны и простоты производства, и потому используется во многих сферах жизни. По данным исследований, на 2022 год доля пластика среди бытовых отходов составляет до 10%. [2]. Также изделия из пластика имеют долгий срок разложения и по большей части не поддаются биологическому разложению [2], а в будущем размеры потребления и производства пластиковых изделий будут только увеличиваться отчего проблема утилизации пластиковых отходов является одной из первоочередных задач для экологов.

Пластик не относится к опасным отходам, но может содержать различные токсичные добавки-пластификаторы, которые могут выделяться в окружающую среду [3]. Часть пластика попадет в гидросферу, где распадется на более мелкие фракции, относимые к микропластику [3]. Из-за большей поверхности частиц, соприкасающейся со средой, облегчается выщелачивание веществ-пластификаторов, которые затем попадают в пищеварительную систему морских организмов и передвигаются выше по пищевой цепи, доходя таким образом до человека [3].

В рамках нашего исследования было рассмотрено несколько распространенных видов пластика, которые используются в быту.

**Целью исследования** являлось установление степени этих видов пластика. Первым из них является полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ). Это термопластик из класса полиэфиров, который занимает первое место по использованию среди других видов пластика. Он используется для производства емкостей для воды, текстильных волокон, электрических изоляций и др.

Помимо ПЭТ были рассмотрены также полиамид, пластик, созданный из синтетических высокомолекулярных соединений, которые содержат в основной цепи амидные группы –CONH–. Он используется в текстильной промышленности, для изготовления пленок различного назначения, деталей различных машин и оборудования, изолирующих элементов и труб. Полиамид может представлять опасность здоровью человека из-за пластификаторов, которые входят в его состав. Часто в роли таких пластификаторов выступают бисфенол А или С и фталаты (соли фталевой кислоты), бензолсульфо кислоты.

Также нами был рассмотрен такой материал, как фторопласт. Это фторсодержащий полимер, который используется для изготовления изолирующей обмотки токопроводящих кабелей и для других нужд электропромышленности.

Исследование токсичности перечисленных выше видов пластика проводилось с помощью метода биотестирования. Суть метода состоит в определении токсичности анализируемого объекта или среды по регистрируемой реакции тест-организмов в стандартных условиях. Реакцией тест-объектов могут выступать изменения поведенческих, физиологических и биохимических показателей. Для исследования были выбраны два тест-объекта: инфузория-туфелька (*Paramecium caudatum*) и люминесцентные бактерии Эколюм.

В качестве объекта исследования были выбраны такие отходы, как бутылки из ПЭТ марки «Красная цена», причем представленные в виде крупной фракции, размеры которой составляли от 1 до 2 см, и мелкой фракции, размеры которой достигали 0,5 мм; бутылки из ПЭТ марки «Святой источник»; отходы материалов из фторопласта и отходы материалов из полиамида. Согласно методике [5], из отходов получали водные вытяжки из навесок. Для того, чтобы отследить динамику изменений токсичности водной среды, в которую попали пластиковые отходы, исследования проводились для отходов, через два часа пребывания в воде и через двадцать четыре часа пребывания в воде.

При проведении исследований использовались критерии оценки степени токсичности пробы, основанные на отклике тест-объектов, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Критерии оценки степени токсичности исследуемой пробы**

Тест-объект	Значение индекса токсичности	Степень токсичности
Инфузории-туфельки ( <i>Paramecium caudatum</i> )	0,0 — 0,4	Допустимая токсичность
	0,4 — 0,7	Умеренная токсичность
	0,7 и выше	Высокая токсичность
Эколюм	Меньше 20	Допустимая токсичность
	20 — 50	Образец токсичен
	50 и выше	Высокая токсичность

Результаты, полученные после проведения экспериментов через два часа пребывания отходов в воде, представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Результаты экспериментов для пластиковых отходов после двух часов экстрагирования в воде.**

Вид пластика	ПЭТ «Красная цена», размеры до 2 см	ПЭТ «Красная цена», размеры до 0,5 мм	ПЭТ «Святой источник»	Полиамид	Фторопласт
Степень токсичности (Paramecium caudatum)	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая
Степень токсичности (Эколюм)	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая

По результатам экспериментов можно сказать, что при исследовании токсичности с использованием *Paramecium caudatum* ни один из видов пластика не проявил токсичность, которая превысила бы допустимый уровень. А при исследовании на люминесцентных бактериях ни одна проба пластика не оказалась токсичной.

Далее интервал наблюдения был увеличен. Для этого исследуемый пластик экстрагировался в воде в течение 24 часов. Полученная водная вытяжка исследовалась аналогично предыдущему этапу. Результаты, полученные после проведения экспериментов, представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Результаты экспериментов для пластиковых отходов после двадцати четырех часов экстрагирования в воде**

Вид пластика	ПЭТ «Красная цена», размеры до 2 см	ПЭТ «Красная цена», размеры до 0,5 мм	ПЭТ «Святой источник»	Полиамид	Фторопласт
Степень токсичности (Paramecium caudatum)	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая
Степень токсичности (Эколюм)	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Образец токсичен	Допустимая

По результатам проведенных экспериментов можно сказать, что при исследовании токсичности с помощью *Paramecium caudatum* также, как и в предыдущем опыте, ни один из видов пластика не проявил токсичность, которая превысила бы допустимый уровень, и динамики изменения также не прослеживается. При исследовании на люминесцентных бактериях индекс токсичности у всех проб несколько возрос, но токсичной оказалась только проба полиамида. Это может быть связано с выщелачиванием пластификаторов, в роли которых могут выступать бисфенолы или фталаты, что повышает индекс токсичности исследуемой пробы.

После проведения исследований можно сделать вывод, что пластиковые отходы, пребывавшие в воде в течение двух и двадцати четырех часов, не проявили токсического воздействия на и *Ragamecium caudatum*, и токсичность всех проб не превысила порогового значения. Также пробы отказались нетоксичными для люминесцентных бактерий, кроме полиамида, токсичность которого возросла через двадцать четыре часа и превысила допустимый уровень. Полученные результаты доказывают, что пластик может оказывать негативное воздействие на окружающую среду, в частности, на экосистему водоема, при длительном пребывании в ней.

### Список литературы

1. Е.В. Потапова. Проблема утилизации пластиковых отходов // Известия Байкальского государственного университета. 2018, вып. 28 (4). С. 535–544.
2. Е.А. Меньшикова. Токсичные загрязнители из пластиковых отходов // лучшие научные исследования 2022: сборник статей IV Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 20 февраля 2022 г. / МЦНС «Наука и Просвещение», г. Пенза, 2022, С. 16–19.
3. Негативное влияние микропластика: системы-мишени организма человека / П. А. Ермачкова, А. Н. Кравченко, О.А. Залата и др. // Мотивационные аспекты физической активности: тез. Докл. V Всероссийской междисциплинарной конференции, Великий Новгород, 26 февраля 2021 г. / Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, 2021, С. 23–28.
4. Д.А. Булгаков, Е.А. Санкова. Вред пластика на примере полиэтилентерефталата / Геоэкологические проблемы современности и пути их решения: тез. Докл. II Всероссийской научно-практической конференции, Орел, 22 мая 2020 г. / ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, 2020, С. 114–122.
5. ФР.1.39.2015Л9244. Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», 2015.

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПО СОРТИРОВКЕ И ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ

Е.В. ЗИМИН, К.А. ПОРОХНЕНКО, Я.А. ХВАЦЕВСКАЯ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Проблема утилизации и сортировки отходов стоит очень остро и является актуальной в наше время. Для решения проблемы постоянного роста объемов не перерабатываемых отходов необходимо создание эффективных перерабатывающих станций. Мобильные станции по переработке отходов позволят значительно снизить нагрузку и объемы отходов, поступающих на перерабатывающие заводы и полигоны.

**Ключевые слова:** *правильная утилизация, мобильная станция по переработке отходов, вторичное использование материалов.*

Необходимо создать перерабатывающую станцию, которая будет качественно и правильно выполнять свою задачу, не наносить ущерба экологии, иметь адекватные габариты и быть простой в использовании, а также экономичной.

В настоящее время в России существует несколько вариантов «мини-заводов» по переработке отходов и несколько вариантов мобильных перерабатывающих станций.

«Мини-заводы» по переработке отходов способны обрабатывать все виды отходов, в зависимости от оборудования.

Преимущества такого комплекса заключаются в том, что он способен перерабатывать большие объемы отходов.

В зависимости от оснащённости и возможностей различного технологического оборудования такие «мини-заводы» могут перерабатывать практически все классы отходов.

Мобильные станции по переработке отходов, в свою очередь, могут утилизировать несколько видов отходов одновременно или быть специализированными для определённого вида отходов (класса отходов).

Преимуществом мобильной станции по переработке отходов является ее простота и относительная компактность, в ней нет ничего лишнего и ее функции четко направлены на выполнение возложенной на нее задачи.

Поскольку установка включает в себя небольшое количество компонентов оборудования, ее легко отремонтировать. Становится легче найти дефекты или поломки.

Первый вопрос, который возникает на этапе разработки это то, что именно должна перерабатывать наша станция. Мобильная станция должна быть универсальной, то есть способной перерабатывать наиболее распространенные виды отходов. Например, пластик.

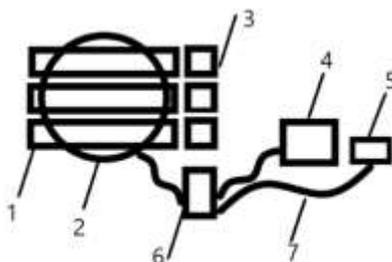
Задача состоит в том, чтобы создать такую мобильную перерабатывающую станцию, которая будет выполнять свои функции эффективно и регулярно, не нанося ущерба окружающей среде и имея небольшие габариты.

Также мусороперерабатывающая станция должна иметь низкую стоимость, чтобы ее использование могло быть широко распространено, таким образом можно добиться снижения роста накопления не переработанных отходов.

Прежде чем приступить к проектированию установки, необходимо изучить оборудование, которое используется для переработки отходов, и понять, какое именно оборудование должно присутствовать на нашей станции по переработке отходов.

На начальном этапе нужно понять, что нужно использовать в разработке.

Итоговый вид перерабатывающей станции представлен на рис. 1.



*Рис. 1. Схема мобильной станции по переработке.*

На рисунке представлены следующие обозначения: 1 — три параллельных горизонтальных ленточных конвейера, 2 — область работы нейросетевого сортировщика, 3 — три контейнера для отсортированных отходов, 4 — измельчитель (дробилка), оборудование по созданию пластиковой нити, 6 — пульт управления установкой, 7 — соединительные провода.

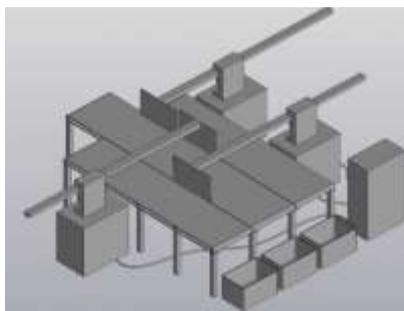


Рис. 2. Модель установки в системе САПР.

Принцип работы такой установки прост.

На три параллельных горизонтальных ленточных конвейера (1) поступают отходы, которые необходимо отсортировать и переработать.

В области работы ИИ (2) с помощью подвижных щупов производится сортировка отходов, по необходимым параметрам, например, на пластик PET, PP и HDPE.

Т.е. щупы распределяют поступающие отходы по трем конвейерам таким образом, чтобы на первом конвейере по итогу оказались отходы только из PET пластика, на втором из PP, а на третьем из HDPE соответственно. Они все попадают в контейнеры для хранения. По итогу, получается три контейнера с отсортированными отходами.

Контейнеры предназначены для хранения отходов, образующихся в процессе переработки.

В дальнейшем необходимо решить, что с этим классом отходов необходимо сделать. Например, измельчить. Измельчение облегчает дальнейшую транспортировку, переработку и использование отходов в качестве вторичного сырья.

### Список литературы

1. Булавин Л. А., Выгорницкий А. В., Лебовка А. И. Компьютерное моделирование физических систем. Долгопрудный: Изд-во «Интеллект», 2011. 352 с.
2. Никитин В. С. Технологии будущего. М.: Техносфера, 2010. 264 с.
3. Kumaг RGP (2007) Мехатронное проектирование системы сортировки макулатуры для эффективной переработки. Диссертация магистра наук по специальности «Машиностроение». Университет штата Северная Каролина, Роли, Северная Каролина

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИЧИНОК НЕКОТОРЫХ НАСЕКОМЫХ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКА

Д.А.ЗУЕВА, Н.А. БЕРЕЗНИКОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В современном мире наблюдается проблема избыточного потребления пластика: навязывание пластиковых изделий сопряжено с коротким сроком их службы, что приводит к повышенному выбросу отходов на полигоны, а также несанкционированному попаданию пластиковых изделий в природные комплексы. Однако, в России до сих пор слабо развиты центры переработки пластиковых отходов. Переработка пластика в безопасный биогумус личинками некоторых насекомых (*Galleria mellonella*, *Zophobas morio*, *Tenebrio molitor*) является инновационной и может стать доступным способом переработки отходов в условиях личного хозяйства. Данная работа посвящена исследованию эффективности переработки полистирола (PS) и полиэтилена (PE) личинками *Galleria mellonella*, *Zophobas morio*, *Tenebrio molitor*.

**Ключевые слова:** переработка пластика, мусорная проблема, отходы, *Galleria mellonella*, *Zophobas morio*, *Tenebrio molitor*, утилизация, вред окружающей среде, полистирол, вермикомпостер, полиэтилен.

Различные изделия из пластика плотно вошли в жизнь современного человека еще с середины двадцатого века, однако меры по ограничению потребления пластиковых изделий начали предпринимать только сейчас. Пластиковая упаковка стала неотъемлемой частью приобретаемых товаров, а излишества стали показателем качества. Все это привело к непредвиденным последствиям: ежегодно человечество выбрасывает 275 миллионов пластиковых отходов, из которых около 8 миллионов попадает в океан [1]. Это не только приводит к массовой гибели некоторых морских животных и птиц в результате асфиксии или кишечной непроходимости, но и создает условия накопления микропластика в морской рыбе, откуда с пищей он попадает в организм человека. Из-за недостаточно развитой культуры сбора полезных фракций на данный момент в России наблюдается проблема отсутствия или недостатка соответствующей инфраструктуры — контейнеров для раздельного сбора с последующей утилизацией отходов и самих компаний-переработчиков..

В данной работе будет рассматриваться альтернативный метод переработки пластика, удобный для осуществления в домашних условиях, что особенно ценно в отдаленных населенных пунктах ввиду недостатка инфраструктуры. Данный способ основан на использовании *Galleria Mellonella*, *Zophobas Morio*, *Tenebrio molitor* в их личиночной стадии, с дальнейшим использованием отходов их жизнедеятельности в качестве домашних удобрений.

*Galleria mellonella*, по другому большая восковая моль или огнёвка пчелиная, является специализированным паразитом медоносных пчел. Гусеницы большой восковой моли питаются воском ульев, что в совокупности с высокой прожорливостью личинок приводит к быстрому разрушению пчелиных семей в случае высокого заражения молью улья. Их уникальная способность перерабатывать воск оказалась связанной с их способностью расщеплять в пищеварительном тракте пластик: в состав воска, в том числе, входят предельные углеводороды, формирующие углеродные связи C—C, аналогичные тем, которые образуются в полиэтилене.

Гусеницы проявляют интерес к пластиковым изделиям и в среднем 100 гусениц способны поглотить 92 миллиграмма пластика за 12 часов [2].

*Zophobas morio* — вид из семейства чернотелок, являющийся популярной кормовой основой фермерских птиц и террариумных животных в качестве продукта, богатого белками и жирами. Их личиночная стадия всеядна и, как обнаружили специалисты из Якутии, более прожорлива, чем *Galleria mellonella*, употребляя 500 миллиграмм пластика на 100 жуков за 12 часов [3][4].

*Tenebrio molitor*, также известный как мучной хрущак или мучник, является домашним вредителем, загрязняющим муку отходами жизнедеятельности. Они широко распространены и, как и *Zoophobas morio*, являются дополнительной пищевой добавкой для насекомых домашних животных. Доказана их устойчивость к вредному составу пластиковых изделий: личинки, при поедании пластика, не проявляли признаков интоксикации токсином гексабромциклодеканом, который добавляется в пластик для термостойкости [5].

Каждый из видов перерабатывает пластик в безопасные химические соединения: октакозан, полиэтиленгликоль и вторичные метаболиты.

Данные виды насекомых в рамках эксперимента сравниваются в показателях эффективности (скорости поедания пластика колонией), автономности, отсутствию вреда для окружающей среды и субъективным показателям человеческого восприятия: эстетика, запах и др., что также важно в условиях домашнего разведения человеком и популяризации биологических боксов для переработки пластиков.

В ходе эксперимента обнаружено, что каждый из данных видов насекомых предпочитает употребление полистирола, оставляя полиэтилен практически нетронутым при наличии выбора пищи. Вероятно, это связано с морфологическими особенностями полистирола: пористая структура позволяет личинкам беспрепятственно передвигаться по ней и хватать жвалами куски пластика, что сложнее сделать с гладким и скользящим полиэтиленовым пакетом. Однако, в отсутствие выбора, как показал эксперимент с колонией *Tenebrio molitor*, личинки начинают употреблять и его. Предпочтение полистирола является скорее плюсом, поскольку полистирол сложно поддается переработке, а также его утилизация связана с различными трудностями, такими как схожесть полипропилена с полистиролом и разные механизмы переработки различных фракций одного и того же вида пластика.

*Galleria mellonella* превзошла другие виды по удельной скорости употребления пластика в первые часы подсадки колоний, насчитывающих более 100 особей. Однако динамика употребления полистирола восковой молью падает вниз с ежедневно, поскольку крупные личинки, приобретенные в рамках эксперимента, быстро окукливаются, зарываясь в пластик, и лишаются всяческой активности до появления имаго. *Zophobas morio*, напротив, пусть и не обладает столь высокой скоростью употребления пищи, способен сохранять постоянство, что связано с более длительной личиночной стадией данного вида (8 недель против 4 недель). *Galleria mellonella* оказалась более автономным видом, чем другие: доказана ее способность размножаться вне воли без естественных условий, то есть без наличия сот, при этом сохраняя постоянство среды, в которой живут гусеницы: *Zophobas morio* и *Tenebrio molitor* выделяют много влаги в ходе своей жизнедеятельности, что, в отсутствие правильной вентиляции, может создать условия вымирания колонии — достигнув пиковой 100% влажности в закрытом боксе 90% личинок *Tenebrio molitor* погибли. *Zophobas morio* является более устойчивым к влажности видом, поэтому при возникновении условий 100% влажности вымерло лишь 60% личинок.

По признакам субъективного восприятия человека для комфортного сосуществования в условиях квартиры лучше всего подойдет *Galleria mellonella*, поскольку вид является узкоспециализированным и не способен навредить при возможном побеге особей из биобокса (взрослые особи восковой моли лишены рабочего ротового аппарата), являются более эстетически привлекательными и обладают отличающимся резким запахом мыла, что, однако, предпочтительнее, чем запах гнили или отходов, которым могут обладать личинки *Tenebrio molitor* и *Zophobas morio* при некорректном условии содержания. Для развития особей в многоквартирном доме в местах общего пользования, либо на садовом участке гораздо лучше подойдет *Zophobas morio* ввиду высокой скорости поедания пластика, не снижающейся так радикально, как у *Galleria mellonella*, а также отсутствием вреда для окружающих: большая восковая моль может навредить пчелкам, если располагать концентрированные колонии насекомых неподалеку от них.

Ввиду продолжительности эксперимента еще предстоит оценить потенциальный вред от микропластика, который неизменно остается при употреблении личинками пластиковых изделий.

### Список литературы

1. Plastic waste inputs from land into the ocean — Jenna A R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Siegler, Miriam Perryman, Anthony Andrady, Ramani Narayan, Kara Lavender.
2. Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella* — Paolo Bombelli, Christopher J Howe, Federica Bertocchini.
3. Самый экологичный стартап: жучиные боксы для переработки пластика дома и в офисе — проект Xenos.
4. Worming the Circular Economy for Biowaste and Plastics: *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor*, and *Zophobas morio* — Zhi-Jue Kuan, Barnabas Kuan-Nang Chan, Samuel Ken-En Gan.
5. Biodegradation of Polyethylene and Plastic Mixtures in Mealworms (Larvae of *Tenebrio molitor*) and Effects on the Gut Microbiome — Anja Malawi Brandon, Shu-Hong Gao, Daliang Ning, Renmao Tian, Shan-Shan Yang, Jizhong Zhou, Wei-Min Wu, Craig S Criddle.

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КАРЬЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

КОМЛЕВА Е.Н.

*Южно-Уральский государственный университет*

**Аннотация.** В данном докладе представлена схема карьерной распределительной сети, на которой показано расположение заземляющих устройств: главной понизительной подстанции и местного заземления приключательных пунктов. Отмечено, что наименее надежным элементом в данной системе заземлений являются заземляющие провода в кабельной составляющей линии. Вследствие того, что они испытывают механические воздействия. Известно, что вопросы контроля непрерывности заземляющей сети изучаются и решаются, но проблема остается актуальной. В докладе предлагается для достижения данной цели, использовать решение, основанное на контроле режимных параметров в карьерной распределительной сети, однако необходимо установить закономерности в изменении режимных параметров. Для этого необходимо создать компьютерную модель, дополняющую существующие модели карьерной распределительной сети, с учетом емкости фазных проводов относительно заземляющего провода и борта забоя карьера.

**Ключевые слова:** карьерная распределительная сеть, компьютерная модель, заземляющая сеть.

Карьерные распределительные сети отличаются своей подвижностью (перемещаются за продвигающимися горными машинами и комплексами). Они подвергаются механическим воздействиям при рыхлении горной массы с помощью взрывов, действие же иных факторов (температуры, солнечной радиации) определяются прежде всего местом нахождения карьера (разреза).

Одним из основных средств обеспечения надежного и безопасного электроснабжения в этих сетях является защитное заземление, которое включает в себя заземление на главной понизительной подстанции, местное заземление, установленное у приключательных пунктов, а также сопротивление самозаземления горных машин, величина которого определяется площадью соприкосновения горной машины с грунтом и удельным сопротивлением последнего. Заметим, что площадь соприкосновения зависит от массы горной машины и рассчитывается таким образом, чтобы давление на грунт у различных машин было примерно одинаковым. Все перечисленные заземления объединены одной заземляющей сетью, примерное исполнение которой показано на рис. 1.

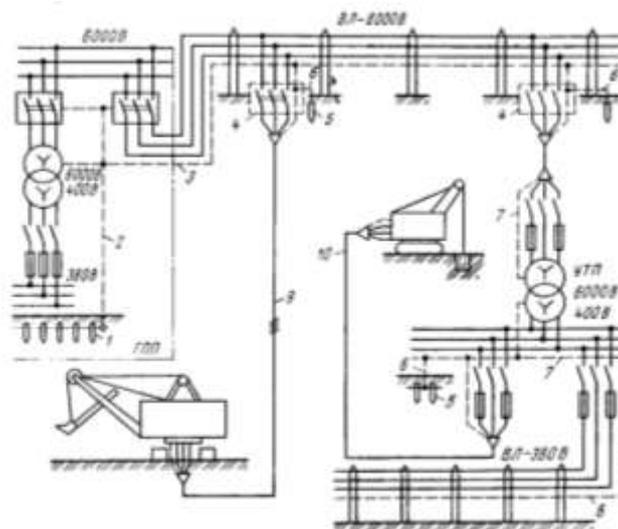


Рис. 1. Схема карьерной распределительной сети: 1 и 5 — главные и местные заземлители; 2 и 7 — заземляющие шины и жилы; 3 и 8 — заземляющие провода; 4 — приклячательные пункты; 6 — отводы от местных заземлителей; 9 и 10 — кабельные линии.

Наименее надежным элементом в этой сети являются заземляющие провода, которые на воздушной составляющей карьерной распределительной сети подвергаются механическим воздействиям при перемещении воздушной линии, а также при проведении взрывных работ. Заземляющий провод в кабельной составляющей этой линии испытывает механические нагрузки при перемещениях в забое экскаватора или бурового станка на новое место.

Вопросы контроля непрерывности заземляющей сети не только изучаются, но и решаются. Однако в полной мере эта проблема не закрыта. Предлагаемые и имеющие местное внедрение устройства требуют установки дополнительных, изготавливаемых, как правило, в единичных экземплярах тех или иных элементов. Последнее является определенным препятствием на пути решения указанной проблемы.

Наиболее перспективным, по нашему мнению, является решение, основанное на контроле режимных параметров в карьерной распределительной сети, теоретические основы которого приведены в [1], поскольку в этом случае никакое дополнительное силовое оборудование не требуется (все в сети имеется: трансформаторы тока и напряжения).

Однако для разработки соответствующего устройства необходимо установить закономерности в изменении режимных параметров при различных условиях возникновения обрыва в заземляющей сети.

Самый оптимальный вариант решения этой сложнейшей задачи — использование компьютерного моделирования.

На кафедре БЖД ЮУрГУ для решения ряда задач применительно к распределительным электрическим сетям было разработано несколько компьютерных моделей [2,3,4].

Для решения задачи, сформулированной ранее, наиболее подходящей является модель, приведенная на рис.2.

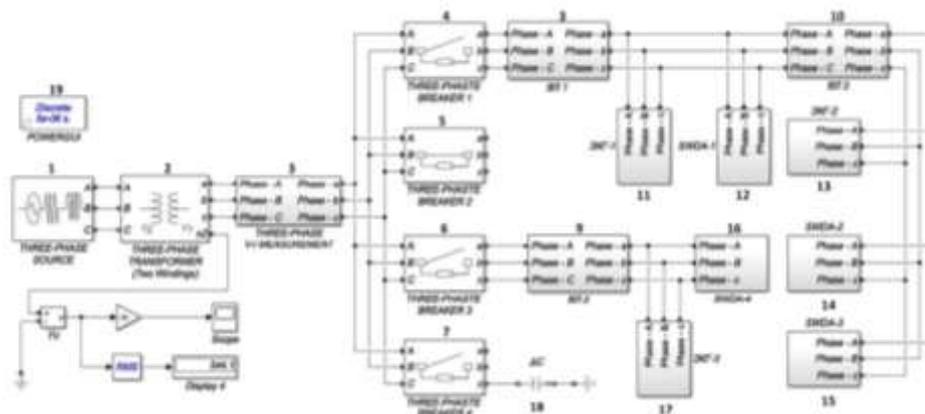


Рис. 2. Компьютерная модель электрической сети напряжением 6 кВ: 1 — трехфазный источник напряжением 35 кВ; 2 — блоки, моделирующие трехфазные трансформаторные подстанции; 3 — блоки измерительных приборов; 4, 5, 6 — выключатели; 8–17 блоки, моделирующие воздушные и кабельные линии с экскаваторами и буровыми станками; 18 — дополнительные емкостные проводимости; 19 — блок «Powergui»; А, В, С — обозначение фаз на входе блока; а, b, с — обозначение фаз на выходе блока.

Параметры изоляции воздушной составляющей карьерной распределительной сети относительно земли в модели (рис. 2) не учитывают емкости фазных проводов относительно заземляющего провода ( $C_{ф-б}$ ) и борта забоя карьера ( $C_{ф-зп}$ ) (см. рис.3).

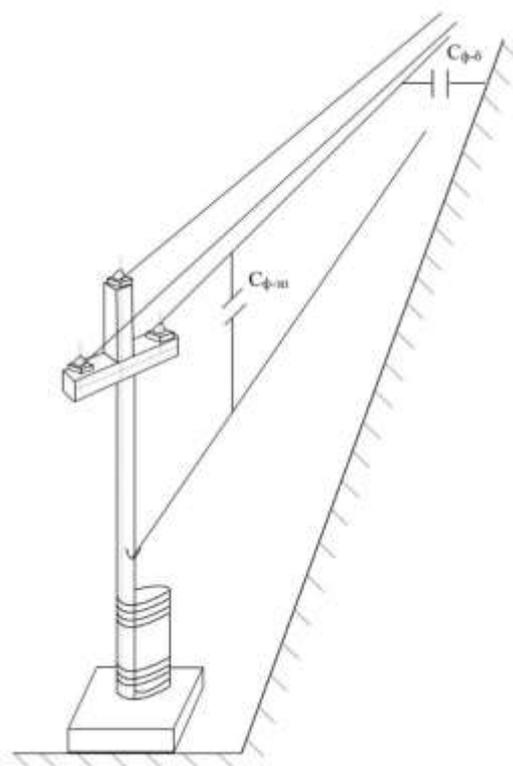


Рис. 3 — Пояснение к образованию емкостей  $C_{ф-б}$  и  $C_{ф-зп}$ .

Дополненная таким образом, компьютерная модель (рис. 2) позволит выявить закономерности в изменении режимных параметров при нарушении в каком-либо месте непрерывности заземляющей сети.

### Список литературы

1. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах [Текст]: Дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01 / Сидоров Александр Иванович. — Челябинск, 1993. — 444 с.
2. Валеев, Р.Г. Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением до 1000 В при однофазных коротких замыканиях [Текст]: Дис.... канд. техн. наук: 05.26.01. / Валеев Рустам Галимянович. — Челябинск, 2014. — 220 с.
3. Хлопова, А. В. Обеспечение безопасности при обрыве фазного провода воздушных линий напряжением 6–10 кв : дис...канд. тех. наук : 05.26.01 : защищена 25.06.2019 : утв. 24.04.2019 / Хлопова Анна Владимировна. — Челябинск, 2019. — 255 с.
4. Бобоев, Х.Д. Обеспечение безопасности в распределительных электрических сетях горнодобывающих предприятий Республики Таджикистан [Текст]: Дис.... канд. техн. наук: 05.26.01. / Бобоев Хуршедшох Давлаталиевич. — Челябинск, 2021. — 175 с.

## **ОСОБЕННОСТИ ЭТАПОВ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ**

П. В. МАНАХОВА, Ю. С. МАКСИМИШИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Сегодня большую часть мусора составляют твердые коммунальные отходы, к которым в том числе относят и отработанные солнечные панели. Однако в состав солнечных панелей входят полимерные материалы, влияние на окружающую среду которых еще не изучено до конца, что делает их захоронение потенциально опасным для природы и человека. В данной работе изучается связь степени токсичности полимерных компонентов отработанных солнечных панелей от температурного фактора и качественного состава окружающей среды, так как данные характеристики способны влиять на протекание некоторых химических процессов. В связи с этим в методику проведения биотестирования были внедрены особенные этапы в процесс пробоподготовки.

**Ключевые слова:** *солнечные панели, индекс токсичности, биотестирование, температурный фактор, качественный состав, отходы полимерных материалов, пробоподготовка.*

В ходе разложения отходов, захороненных на полигонах, выделяются химические соединения, способные реагировать друг с другом и компонентами природы. Это взаимодействие во многом зависит от параметров и качественного состава окружающей среды. Например, флуктуации температуры влияют на многие химические реакции, индуцируя и катализируя их. Природные соединения способны вступать в реакцию с выделяющимися химическими соединениями.

Кристаллические солнечные панели, в состав которых входят фотогальванический элемент и стекло, а также полимерные материалы EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar (поливинилфторид), принято относить к твердым коммунальным отходам, составляющим большую часть общего объема мусора. В силу того, что солнечные батареи вошли в эксплуатацию сравнительно недавно, и срок их службы составляет 20–30 лет, детальный анализ влияния бывших в использовании компонентов панели на окружающую среду еще не был проведен. А как показали ранние исследования [1], в состав полимеров входят

некоторые опасные примеси, природу и степень токсичности которых еще предстоит выяснить.

В качестве объекта исследования были выбраны полимерные материалы EVA и Tedlar отработанной солнечной панели, определялась зависимость уровня токсичности объектов от температуры и качественного состава окружающей среды. Проведенные ранее исследования [1] показали, что индекс токсичности не зависит от фракции компонентов, поэтому в рамках данной статьи была задействована только мелкая фракция ( $f < 5 \text{ mm}$ ). Рассматривались два температурных диапазона  $+25^\circ\text{C}$  и  $+70^\circ\text{C}$ . Для проведения исследования была выполнена особая пробоподготовка, включающая следующие действия:

демонтаж отработанной солнечной панели и выделение необходимых компонентов: был произведен механический демонтаж панели, выделены компоненты, такие как полимеры EVA, Tedlar®;

фракционирование: измельчение компонентов с помощью роторной мельницы марки «Retsch»;

отбор навески и смешивание с минеральной водой марки Вонаqua, точный химический состав которой приведен в таблице 1;

перемешивание смеси: экстрагирование проводилось в течение 2-х часов на аппарате для встряхивания жидкости.

выдержка, отстаивание и фильтрация надосадочной жидкости: подготовленные смеси каждого вещества выдерживались при температурах окружающей среды  $25^\circ\text{C}$  и  $70^\circ\text{C}$  в течение 2х часов. После чего надосадочная жидкость была профильтрована через бумажный фильтр.

Таблица 1

### Состав минеральной воды Вонаqua

Основной химический состав, мг/л:			
Катионы:		Анионы:	
Натрий ( $\text{Na}^+$ )	100-200	Гидрокарбонаты ( $\text{HCO}_3^-$ )	250-400
Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ )	25-70	Хлориды ( $\text{Cl}^-$ )	150-250
Магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )	10-50	Сульфаты ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	<30
Калий ( $\text{K}^+$ )	<5		
Общая минерализация: 500-1000 мг/л			
Общая жесткость 2-6 мг-экв/л			

Для оценки степени и индекса токсичности полимерных компонентов отработанных солнечных панелей был использован метод биотестирования [4] — метод интегральной оценки суммарной токсичности среды на основании биологической реакции живых организмов. В качестве тест-организмов были выбраны *Paramecium caudatum* [4]. Для инфузорий характерен хемотаксис — двигательная реакция организма на присутствие химических компонентов в окружающей среде. Причем как показали детальные исследования реакции хемотаксиса [2], изменения в характере движения клеток позволяют оценить не только сам факт наличия в среде токсикантов, но и изменение их концентрации.

По истечении 30 минут после процедуры наслаивания инфузории распределяются по объему кюветы один из трех способов:

- i) клетки равномерно заполняют кювету, заплывая в зону исследуемой среды;

ii) клетки преимущественно остаются в зоне кюветы свободной от изучаемого токсиканта;

iii) клетки вовсе не поднимаются в зону исследуемой среды.

Отношение числа клеток в контрольной пробе и поверяемой дает численную оценку тест-параметра, который в свою очередь характеризует токсический эффект поверяемой пробы. Это отношение называется индексом токсичности ( $T$ ) и является безразмерной величиной.

$$T = \frac{|I_{\text{ср.к}} - I_{\text{ср.а}}|}{I_{\text{ср.к}}} \cdot K \quad (1)$$

Где  $I_{\text{ав.с}}$  — среднее показание прибора для контрольной пробы,  $I_{\text{ав.п}}$  — среднее показание прибора для поверяемой пробы,  $K$  — коэффициент разбавления пробы. В соответствии с методикой [3], пробы делятся на 3 группы токсичности в зависимости от значения индекса токсичности:

Допустимая степень токсичности ( $0,00 < T \leq 0,40$ )

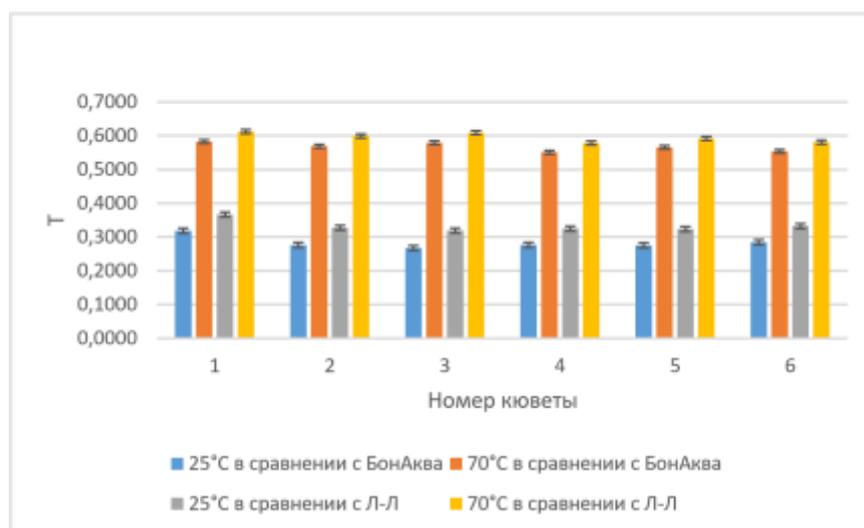
Умеренная степень токсичности ( $0,40 < T \leq 0,70$ ) III.

Высокая степень токсичности ( $T > 0,70$ ).

Для исключения погрешности проводились многократные измерения: все водные вытяжки проверялись на трех кюветах, с каждой из которых прибор снимал 10 значений.

В эксперименте использовался Бiotестер-2М. Всего было приготовлено и проанализировано более 42 проб, для 24 из которых была рассчитана интегральная токсичность.

Индексы токсичности EVA и Tedlar считались как относительно контроля, приготовленного на растворе Лозино-Лозинского, так и для контроля на минеральной воде по формуле (1). Результаты представлены на рис. 1 и рис. 2.



### Индекс токсичности EVA

Рис. 1. Усредненный индекс токсичности EVA при выдержке в минеральной воде в течение 2 часов (тест-организм — *Paramecium caudatum*).

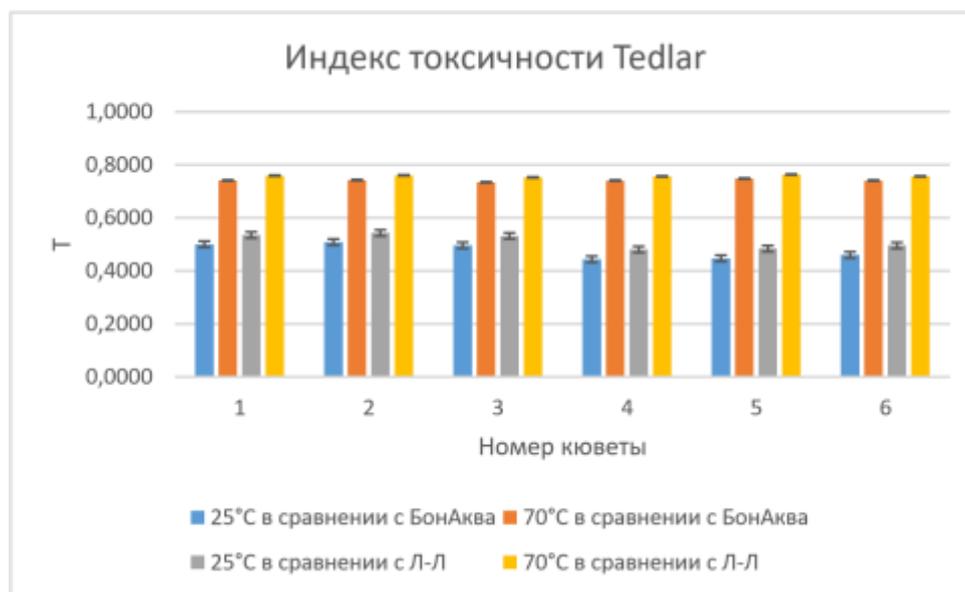


Рис. 2. Усредненный индекс токсичности Tedlar при выдержке в минеральной воде в течение 2 часов (тест-организм — *Paramecium caudatum*)

Как видно из полученных диаграмм, индексы токсичности EVA и Tedlar резко увеличиваются с повышением температуры. Более того, индекс токсичности Tedlar превышает 0,40 уже при температуре 25°C. Причем индекс токсичности меняется незначительно при сравнении числа клеток в поверяемых пробах с числом клеток в контроле, приготовленных на основе раствора Лозина-Лозинского, и контроле на минеральной воде. Так как осадки, попадающие на полигоны, тоже содержат соли, то можно полагать, что результаты опытов, проведенных на минеральной воде, являются даже более показательными и приближенными к реальности, чем результаты опытов на дистиллированной воде.

Таким образом, проведенные в рамках данной статьи эксперименты по изучению степени и индекса токсичности полимерных компонентов EVA и Tedlar отработанных солнечных панелей, а также зависимости их токсичности от температурного фактора и качественного состава окружающей среды показали, что Tedlar является более опасным, и его токсичность достигает пограничных значений уже при температуре 25°C. Предположительно Tedlar содержит опасные химические соединения и примеси, точный состав которых можно определить только с помощью более сложных методов анализа материала.

При повышении температуры токсичность EVA также превышает пограничные значения. Это позволяет сделать заключение, что захоронение солнечных панелей на полигонах является небезопасным способом утилизации данного вида отходов. Кроме того, в окружающей среде неизбежно присутствуют различные химические соединения. Поэтому результаты опытов на минеральной воде можно считать более показательными, чем результаты опытов на дистиллированной воде.

### Список литературы

1. Веженкова И., Семенова М., Ковалевская А., Грязнов А., Родригес-Барросо М.Р., Хименес Кастанеда Р. Определение химического состава примесей и влияние на степень токсичности компонентов солнечных панелей, E3S Web of Conferences, 220, 01057 (2020).

2. Robert M. Macnab, D.E. Koshland, Jr. The Gradient-Sensing Mechanism in Bacterial Chemotaxis, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 69, No. 9, pp. 2509-2512, September 1972
3. ФР.1.39.2015Л9244. Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс — методом с применением прибора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», 2015.
4. Олкова А.С. Разработка стратегии биотестирования водных сред с учетом многофакторности реакций ответных реакций тест-организмов, 2020.

## **ОСОБЕННОСТИ ЭТАПОВ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТРАБОТАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ**

П. В. МАНАХОВА, Т.В. КУСТОВ, М.И. СЕМЕНОВА, Ю. С. МАКСИМИШИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Сегодня большую часть мусора составляют твердые коммунальные отходы, к которым в том числе относят и отработанные солнечные панели. Однако в состав солнечных панелей входят полимерные материалы, влияние на окружающую среду которых еще не изучено до конца, что делает их захоронение потенциально опасным для природы и человека. В данной работе изучается связь степени токсичности полимерных компонентов отработанных солнечных панелей от температурного фактора и качественного состава окружающей среды, так как данные характеристики способны влиять на протекание некоторых химических процессов. В связи с этим в методику проведения биотестирования были внедрены особенные этапы пробоподготовки.

**Ключевые слова:** *солнечные панели, индекс токсичности, биотестирование, температурный фактор, качественный состав, отходы полимерных материалов, пробоподготовка.*

В ходе разложения отходов, захороненных на полигонах, выделяются химические соединения, способные реагировать друг с другом и компонентами природы. Это взаимодействие во многом зависит от параметров и качественного состава окружающей среды. Например, флуктуации температуры влияют на многие химические реакции, индуцируя и катализируя их. Природные соединения способны вступать в реакцию с выделяющимися химическими соединениями.

Кристаллические солнечные панели, в состав которых входят фотогальванический элемент и стекло, а также полимерные материалы EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид), принято относить к твердым коммунальным отходам, составляющим большую часть общего объема мусора. В силу того, что солнечные батареи вошли в эксплуатацию сравнительно недавно, и срок их службы составляет 20 — 30 лет, детальный анализ влияния бывших в использовании компонентов панели на окружающую среду еще не был проведен. А как показали ранние исследования [1], в состав полимеров входят некоторые опасные примеси, природу и степень токсичности которых еще предстоит выяснить.

В качестве объекта исследования были выбраны полимерные материалы EVA и Tedlar® отработанной солнечной панели, определялась зависимость уровня токсичности объектов от температуры и качественного состава окружающей среды. Проведенные ранее исследования [1] показали, что индекс токсичности не зависит от фракции компонентов, поэтому в рамках данной статьи была задействована только мелкая фракция

( $f < 5$  mm). Рассматривались два температурных диапазона  $+25^{\circ}\text{C}$  и  $+70^{\circ}\text{C}$ . Для проведения исследования была выполнена особая пробоподготовка, включающая следующие действия:

1) демонтаж отработанной солнечной панели и выделение необходимых компонентов: был произведен механический демонтаж панели, выделены компоненты, такие как полимеры EVA, Tedlar®;

2) фракционирование: измельчение компонентов с помощью роторной мельницы марки «Retsch»;

3) отбор навески и смешивание с минеральной водой марки Вонаqua, точный химический состав которой приведен в таблице 1;

4) перемешивание смеси: экстрагирование проводилось в течение 2-х часов на аппарате для встряхивания жидкости.

5) выдержка, отстаивание и фильтрация надосадочной жидкости: подготовленные смеси каждого вещества выдерживались при температурах окружающей среды  $25^{\circ}\text{C}$  и  $70^{\circ}\text{C}$  в течение 2х часов. После чего надосадочная жидкость была профильтрована через бумажный фильтр.

Выбор марки минеральной воды обусловлен рядом причин. Состав Вонаqua жестко ограничен. Сравнительный анализ показал, что качественный состав Вонаqua идентичен составу раствора Лозино-Лозинского, являющегося оптимальной средой для культивации и содержания инфузорий. Единственное отличие, концентрации ионов в минеральной воде несколько выше, чем в растворе Лозино-Лозинского.

Таблица 2

### Состав минеральной воды Вонаqua

Основной химический состав, мг/л:			
Катионы:		Анионы:	
Натрий ( $\text{Na}^+$ )	100-200	Гидрокарбонаты ( $\text{HCO}_3^-$ )	250-400
Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ )	25-70	Хлориды ( $\text{Cl}^-$ )	150-250
Магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )	10-50	Сульфаты ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	<30
Калий ( $\text{K}^+$ )	<5		
Общая минерализация: 500-1000 мг/л			
Общая жесткость 2-6 мг-экв/л			

Для оценки степени и индекса токсичности полимерных компонентов отработанных солнечных панелей был использован метод биотестирования [4] — метод интегральной оценки суммарной токсичности среды на основании биологической реакции живых организмов. В качестве тест-организмов были выбраны *Paramecium caudatum* [4]. Для инфузорий характерен хемотаксис — двигательная реакция организма на присутствие химических компонентов в окружающей среде. Причем как показали детальные исследования реакции хемотаксиса [2], изменения в характере движения клеток позволяют оценить не только сам факт наличия в среде токсикантов, но и изменение их концентрации.

По истечении 30 минут после процедуры наслаивания инфузории распределяются по объему кюветы один из трех способов: 1) клетки равномерно заполняют кювету, заплывая в зону исследуемой среды; 2) клетки преимущественно остаются в зоне кюветы

свободной от изучаемого токсиканта; 3) клетки вовсе не поднимаются в зону исследуемой среды.

Отношение числа клеток в контрольной пробе и поверяемой дает численную оценку тест-параметра, который в свою очередь характеризует токсический эффект поверяемой пробы. Это отношение называется индексом токсичности (Т) и является безразмерной величиной.

$$T = \frac{|I_{\text{ср.к}} - I_{\text{ср.а}}|}{I_{\text{ср.к}}} \cdot K \quad (1)$$

Где  $I_{\text{ср.к}}$  — среднее показание прибора для контрольной пробы,  $I_{\text{ср.а}}$  — среднее показание прибора для поверяемой пробы,  $K$  — коэффициент разбавления пробы. В соответствии с методикой [3], пробы делятся на 3 группы токсичности в зависимости от значения индекса токсичности:

Допустимая степень токсичности

Умеренная степень токсичности

Высокая степень токсичности

Для исключения погрешности проводились многократные измерения: все водные вытяжки проверялись на трех кюветках, с каждой из которых прибор снимал 10 значений. В эксперименте использовался Биотестер-2М. Всего было приготовлено и проанализировано более 96 проб, для 24 из которых была рассчитана интегральная токсичность.

Для исключения возможности губительного воздействия минеральной воды на тест-организмы, сначала был проведен ряд опытов, где Вонаква рассматривалась в качестве анализируемой пробы. Индекс токсичности составил  $0,07 \pm 0,01$ , что позволяет говорить о безопасности использования минеральной воды в качестве экстрагента.

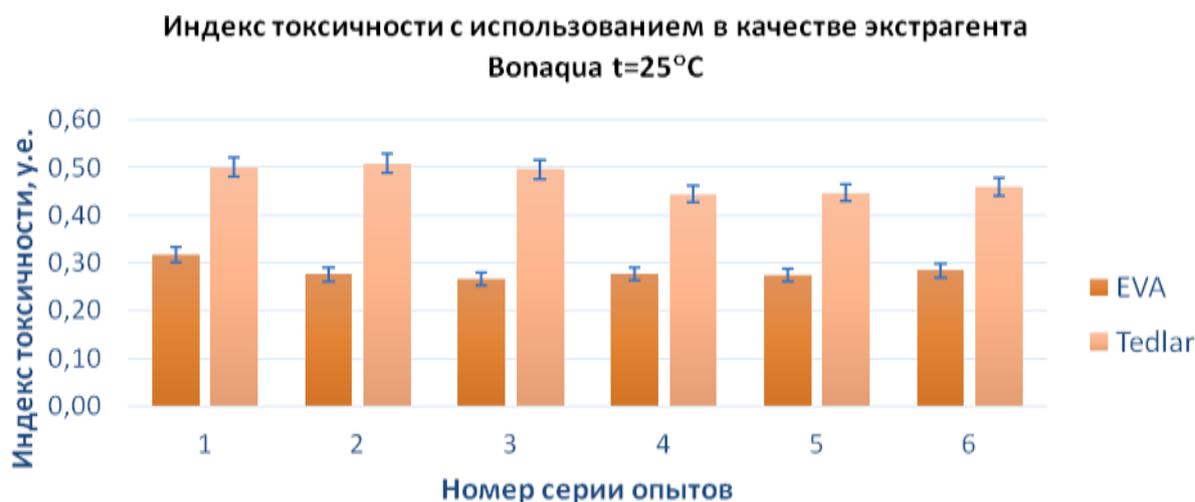


Рис. 4. Усредненные значения индексов токсичности EVA и Tedlar® при выдержке в минеральной воде в течение 2 часов при температуре 25 °С (тест-организм — *Paramecium Caudatum*).

На рис. 1 показаны результаты исследования проб, для которых экстрагирование проводилось в течение 2 часов на минеральной воде при температуре 25°C.

На рис. 2 приведены результаты исследования проб, для которых экстрагирование проводилось в течение 2 часов на минеральной воде при температуре 70°C.

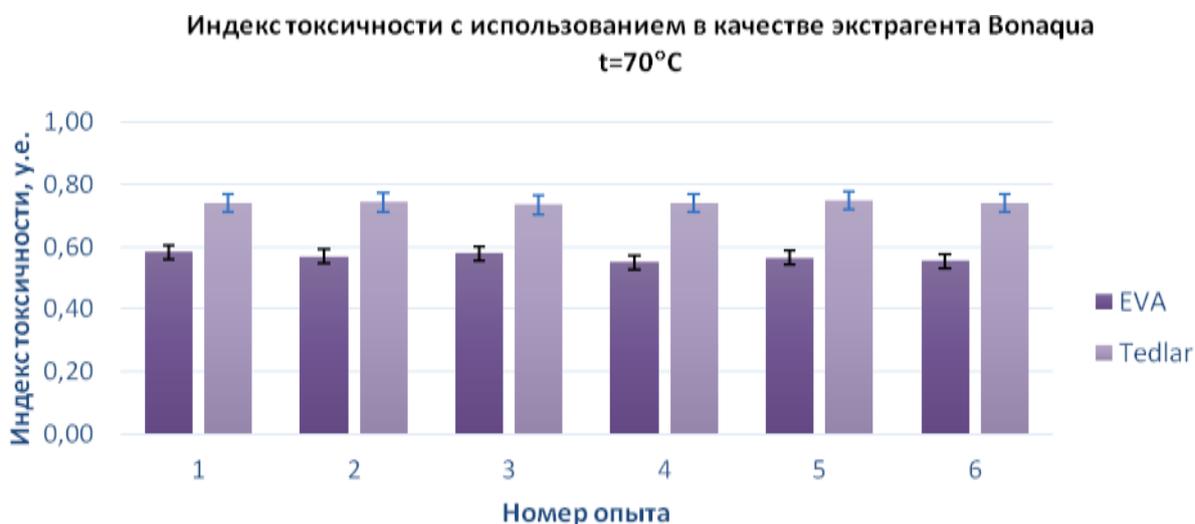


Рис. 5. Усредненные значения индексов токсичности EVA и Tedlar® при выдержке в минеральной воде в течение 2 часов при температуре 70 °С (тест-организм – *Paramecium Caudatum*).

Как видно из полученных диаграмм, индексы токсичности EVA и Tedlar® резко увеличиваются с повышением температуры. Более того, индекс токсичности Tedlar® превышает 0,40 уже при комнатной температуре. Так как осадки, попадающие на полигоны, содержат соли, то можно полагать, что результаты опытов, проведенных на минеральной воде, являются даже более показательными и приближенными к реальности, чем результаты опытов на дистиллированной воде.

Таким образом, проведенные в рамках данной статьи эксперименты по изучению степени и индекса токсичности полимерных компонентов EVA и Tedlar® отработанных солнечных панелей, а также зависимости их токсичности от температурного фактора и качественного состава окружающей среды показали, что индекс токсичности Tedlar® превышает пороговое значение 0,40 уже при температуре 25°C. Предположительно Tedlar® содержит опасные примеси и добавки, точный состав которых можно определить только с помощью более сложных методов анализа материала. При повышении температуры токсичность EVA также превышает пороговое значение. На основании полученных данных можно утверждать, что захоронение солнечных панелей на полигонах, где выделяется тепло в ходе реакций разложения, является небезопасным способом утилизации данного вида отходов. Кроме того, использование минеральной воды в качестве экстрагента позволяет приблизить лабораторные условия к действительной среде, куда попадают солнечные панели после захоронения.

### Список литературы

1. Веженкова И., Семенова М., Ковалевская А., Грязнов А., Родригес-Барросо М.Р., Хименес Кастанеда Р. Определение химического состава примесей и влияние на степень токсичности компонентов солнечных панелей, E3S Web of Conferences, 220, 01057 (2020)
2. Robert M. Macnab, D.E. Koshland, Jr. The Gradient-Sensing Mechanism in Bacterial Chemotaxis, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 69, No. 9, pp. 2509-2512, September 1972
3. ФР.1.39.2015Л9244. Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс — методом с применением прибора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», 2015.

4. Олкова А.С. Разработка стратегии биотестирования водных сред с учетом многофакторности реакций ответных реакций тест-организмов, 2020.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ УСТОЙЧИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

А.Д. МУХАМЕТЗЯНОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В современном растущем мире города развиваются чрезвычайно быстро, что обуславливает необходимость внедрения новых стандартов и принципов, отвечающих актуальным тенденциям. Строительство является одним из крупнейших потребителей ресурсов и производителем отходов, что, несомненно, заставляет задуматься о его эффективности. Одним из возможных решений данной проблемы, является подбор материалов, соответствующих принципам устойчивого строительства. Для этого было проведено исследование ресурсного цикла материалов с использованием специального программного обеспечения.

*Ключевые слова:* устойчивое строительство, ресурсный цикл, отходы, архитектура, строительные материалы

XX век стал несомненно прорывным для всего человечества практически во всех сферах жизнедеятельности. Беспрецедентный рост городов, промышленности и технологий, выявил потребность внедрения принципов устойчивого развития в этих сферах.

Устойчивое развитие территорий, базируется на принципах обеспечения безопасных и благоприятных условиях жизнедеятельности человека, минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, направлено на сохранение и рациональное использование природных ресурсов.

В концепцию устойчивого строительства входит много характеризующих критериев. Например, важным показателем является малоэтажная застройка, удобная транспортная инфраструктура для комфортной жизни, доступность социальных учреждений, наличие зеленых дворов и благоустроенная территория. Также немаловажным является использование локальных источников возобновляемой энергии и энергосберегающих технологий, что позволит сэкономить ресурсы и материальные средства жителей. Стоит еще обратить внимание на то, как архитектурный облик здания вписывается в окружающий ландшафт местности. При создании жилых домов необходимо помнить, что они строятся для людей, поэтому стоит также обеспечивать развитие и разнообразность местной экономики, поддерживая малый бизнес.

Необходимо отметить, что большая часть градообразующей политики в процессе активного развития городов на территории России ранее проводилась без особого учета воздействия на природную среду, без попыток ее сохранения и восстановления в целях улучшения качества жизни населения. Высокое потребление энергии, ресурсного потенциала и увеличение автомобильного трафика привело к высокому уровню химического, физического и биологического загрязнения городской среды.

Выбор строительных материалов является одним из ключевых критериев устойчивого строительства. Они должны быть безопасными в эксплуатации, надежными и долговечными. Также при выборе материалов необходимо проводить надлежащий анализ их воздействия на окружающую среду на всех этапах его жизненного цикла: от добычи до утилизации. Важно, чтобы количество затрачиваемой энергии, ресурсов, а также выбросов и отходов было минимальным. Необходимо учесть и то, сколько энергии будет затрачиваться на их утилизацию или переработку.

Для расчета влияния производства материалов на окружающую среду была использована специализированное программное обеспечение, позволяющее рассчитать ресурсные циклы используемых материалов.

Для анализа были выбраны следующие материалы: железобетон и бетон, т.к. при строительстве данные материалы используются больше всего.

Так, для производства бетона, расходуются следующие ресурсы: цемент, песок, щебень, вода в следующих пропорциях 1:3:5:0,5 соответственно.

Песок, щебень и вода в расчете жизненного цикла не учитываются, так как предполагается, что материалы уже готовы к использованию. Поэтому при расчете жизненного цикла бетона учитывается только цемент, так как он требует отдельного производства и множество ресурсов.

**Цемент** — это искусственное неорганическое связующее вещество, которое используют в строительстве для изготовления строительных растворов и бетона. Является одним из основных строительных материалов. Расчеты проводились для 2т бетона.

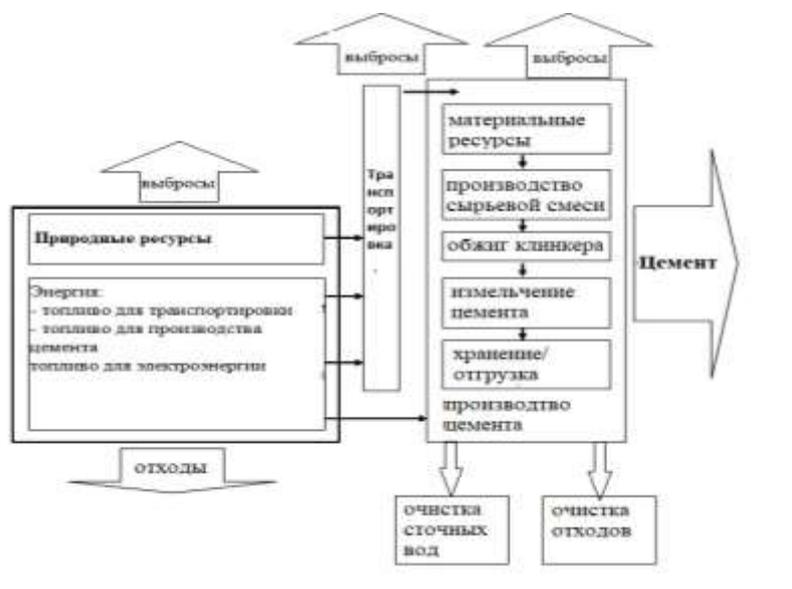


Рис.1. Схема производства цемента.

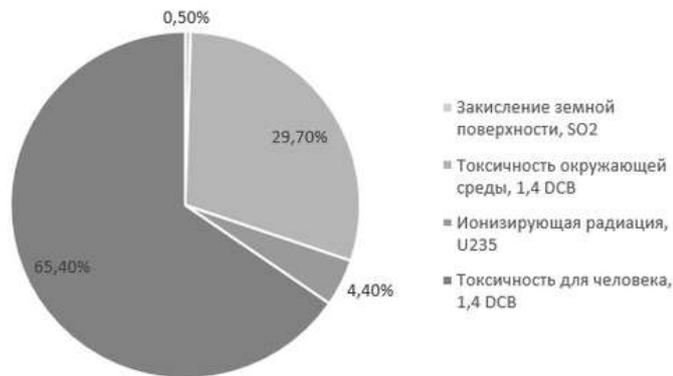


Рис.2. Оценка воздействия на окружающую среду производства цемента.

**Железобетон** — это композитный высокопрочный строительный материал, который состоит из бетона и стальных прутьев. Железобетон является основным материалом для фундаментов зданий. [2]

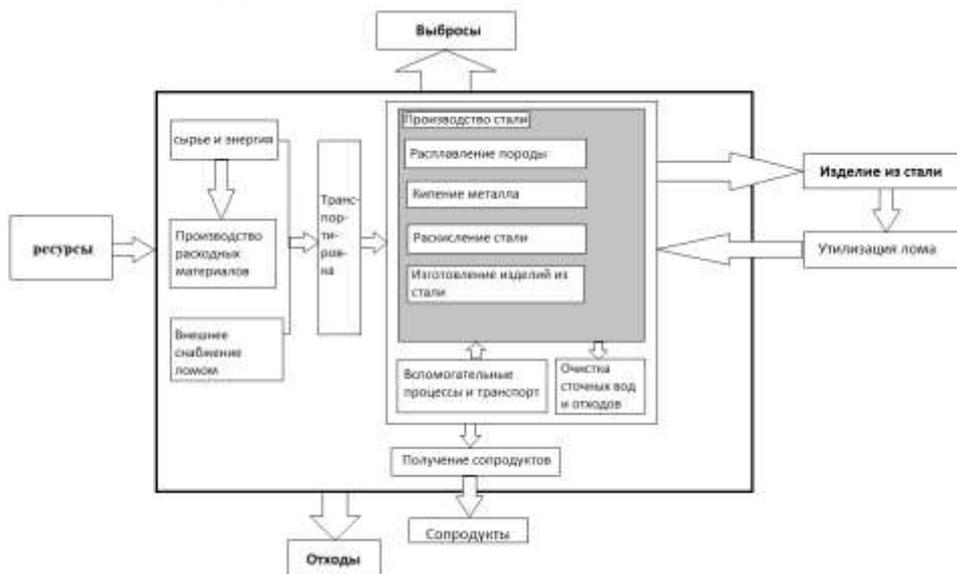


Рис. 3. Схема производства изделий из стали.

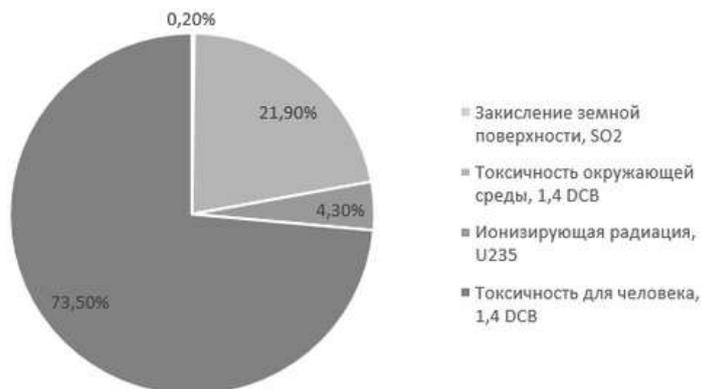


Рис.4. Оценка воздействия на окружающую среду производства изделий из стали.

Проанализировав полученные расчетные данные по жизненному циклу цемента и стали можно сделать вывод, что по массе больше всего влияния имеют следующие категории воздействия: токсичность для человека и токсичность окружающей среды.

Потенциал токсичности для человека — это расчетный показатель, отражающий потенциальный вред от единицы химического вещества, попавшего в окружающую среду.

Эти побочные продукты, в основном мышьяк, дихромат натрия и фтористый водород, вызваны, в основном, производством электроэнергии из ископаемых источников. Это потенциально опасные химические вещества для человека при вдыхании, проглатывании и при простом контакте. Может являться причиной развития рака и различных респираторных заболеваний у людей. Эта категория воздействия измеряется в эквивалентах 1,4-дихлорбензола.

Токсичность окружающей среды измеряется как три отдельные категории воздействия на такие среды, как: пресноводные экосистемы, морские экосистемы и наземную экосистему. Выброс некоторых веществ, таких как тяжелые металлы, может оказать серьезное воздействие на экосистему. Характеризующие коэффициенты выражаются с использованием эталонной единицы — кг 1,4-дихлорбензола. [5]

Для уменьшения содержания вредных веществ и предотвращения ухудшения состояния здоровья населения и экосистем необходимо использовать более чистое топливо для производства энергии и транспортировки, т.к. большая часть опасных выбросов образуется при сжигании топлива. Стоит отдать предпочтение электродуговым печам вместо доменных при производстве стали. Также необходимо усовершенствовать установки очищающие выбросы и отходы производства.

### Список литературы

1. Rodina O., Samolkina E., Erofeeva I. Sustainable building and urban design // Mordovia State University Saransk 2018.
2. ГОСТ 24476-80. Фундаменты железобетонные сборные под колонны каркаса межвидового применения для многоэтажных зданий.
3. ГОСТ Р ИСО 14040-99. Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура.
4. Aitor P. Acero, Rodríguez C., Cirot A. LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, Version: 1.5.4 // 16 March 2015.
5. Dr Cirot A., Di Noi C., Lohse T., Srocka M. Open LCA 1.9 Comprehensive User Manual // June 2019.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗВРАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦИКЛ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ HDPE

Е.А. ПОНОМАРЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В настоящее время очистка отходов является важной проблемой современного мира, поскольку отходы производства могут потенциально являться сырьем. Основной задачей данной работы является возможность преобразования производственных отходов в отходы потребления. Данная статья посвящена возможности возврата в производственный цикл отходов переработки пластика высокой плотности посредством отмывания и ультразвукового воздействия на отход с примесями.

*Ключевые слова: переработка, пластик, HDPE, производственные отходы, пластиковая стружка, пластик высокой плотности, ультразвук, эффект кавитации.*

Одной из самых актуальных проблем современного мира можно назвать образование большого количества разнообразных по своему составу отходов. При этом следует различать отходы производства и потребления.

Отходы потребления образуются повсеместно в результате жизнедеятельности нашего общества. Производства — в результате осуществления производственных процессов.

Наиболее перспективным видом деятельности по обращению с отходами является утилизация. В процессе утилизации отход может быть рассмотрен в качестве сырья. Если в процессе утилизации осуществляется технологическая операция или совокупность технологических операций, в результате которых из отходов производится один или несколько видов товарной продукции, то можно говорить о переработке отходов.

В настоящее время в Российской Федерации на законодательном уровне введен запрет на размещение, совместно с твердыми коммунальными отходами, отходов, содержащих полезные компоненты. Такие отходы должны быть обезврежены, если их класс опасности первый или второй, или утилизированы. В каждом из перечисленных видов обращения с отходами полезные компоненты извлекаются и могут быть использованы повторно.

Под данный запрет попал отход, который носит название «отходы полиэтиленовой тары незагрязненной». Он неоднороден по своему составу. Для облечения процесса переработки данного отхода, разные по своему составу части должны быть промаркированы согласно ISO 11469: 2016.

Согласно международному стандарту, отходы полиэтиленовой тары незагрязненной состоят из полиэтилентерефталата и полиэтилена высокой плотности, которые маркируются цифрами один и два соответственно.

Полиэтилен высокой плотности также может обозначаться как HDPE. Это термопластичный полимер, который получают из мономера этилена.

Переработкой полиэтилена высокой плотности занимаются специализированные предприятия, имеющие соответствующее оборудование и обученный персонал для осуществления данной деятельности.

В настоящее время переработка HDPE осуществляется в несколько основных этапов.

Первым этапом является дробление сырья, т.е. отходов потребления HDPE, поступивших на переработку. В результате такого измельчения на шредерах получают мелкие гранулы, которые поступают на термическую обработку, являющуюся вторым этапом.

Плавление гранул осуществляется в специально предназначенных для этого устройствах с нагревательными элементами. Данный процесс требует особого внимания к температурному режиму, поскольку при превышении удельной теплоты плавления происходит разрушение структуры материала. Также следует уделять внимание чистоте сырья.

Третьим этапом идет постобработка, зависящая от назначения и требований к получаемым изделиям. Далее возможно разветвление технологического процесса на этапе постобработки. Основным возможным вариантом является обработка на фрезерной машине с числовым программным управлением. На этом этапе образуется наибольшее количество производственных отходов, являющихся потенциальным сырьем.

Таким отходом является стружка полиэтилена высокой плотности, которая может быть загрязнена за счет иных производственных процессов, осуществляющихся на производстве совместно с переработкой HDPE.

Ниже на рис. 1 представлена структурная схема технического процесса.



Рис 1. Технический процесс.

Наиболее часто совместными процессами является обработка на токарных и фрезерных станках черного и цветного металла.

Также к возможным загрязнителям можно отнести песок, поскольку производственные помещения зачастую не подвергаются тщательной уборке.

Стружка полиэтилена высокой плотности, загрязненная данными примесями не может быть возвращена в производственный цикл по причине резкого ухудшения качества получаемого на этапе плавления материала.

Такая стружка будет являться отходом, подлежащим размещению на соответствующих объектах. Данный вид обращения затруднен, поскольку согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, такой отход классификации не подлежит и, следовательно, отсутствует в лицензиях всех существующих в нашей стране объектах размещения отходов. Из вышеперечисленного также следует, что данный отход не подлежит тщательному контролю, а это значит, зачастую на производствах происходят накопления данного отхода.

Данную проблему можно решить двумя способами. К первому следует отнести оптимизацию производства и исключение иных производственных процессов в непосредственной близости от обработки HDPE на фрезерных станках.

Вторым способом является очистка полученного отхода от примесей и преобразование отхода в сырье.

Преобразование отхода в сырье может происходить разными способами в зависимости от состава примесей в отходе, такими как сортировка по плотности, статическим свойствам и т.д. Но самым эффективным вариантом является эффект акустической кавитации, то есть образование пузырьков для дальнейшего высвобождения энергии для очистки пор материала от забившихся в них примесей, совместно с предшествующим отмыванием. На этапе отмывания в воде используется разность

плотностей материалов в смеси, таким образом тяжелые частицы, такие как песок и металл, опускаются на дно, а легкие — полиэтилен высокой плотности, останутся на поверхности. Такой подготовкой возможно добиться основного исключения примесей из смеси, но данный метод не учитывает слипшиеся частицы, а также пористость потенциального сырья. Для оставшейся задачи применяется ультразвук. Для достижения эффекта акустической кавитации необходимо использовать ультразвуковые ванны с высокочастотными генераторами, которые за счет мощности будут создавать резонанс в растворе. Чтобы достичь эффекта ультразвука в жидкости, высокочастотный генератор преобразует частоту сети в соответствующую частоту ультразвукового прибора, а затем трансформируется в механические колебания. В результате колебаний в растворе ультразвуковой ванны формируются мельчайшие вакуумные пузырьки, которые создают волны давления, что в итоге приводит к очищению материала, от слипшихся и забившихся примесей.

Таким образом исследование возможности возврата в производственный цикл отходов переработки HDPE, позволяет преобразовывать отходы производства в продукты потребления, вернув их в технологический цикл. А также возникает возможность увеличения номенклатуры сырья с помощью разделения пластика от примесей, образующихся во время процесса переработки.

#### Список литературы

1. Кулезнев В. Н., Гусева В. К. Основы Технологии Переработки Пластмасс, 2004.
2. Бернхард Э. Переработка Термопластичных Материалов.
3. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров, 2005.
4. Луканин А.В. Инженерная экология. Защита литосферы от вредных промышленных и бытовых отходов. — 556 с.
5. Бобович Б.Б. Обращение с отходами производства и потребления. — 436 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТЕСТРЕАКЦИИ ПРОСТЕЙШИХ И БАКТЕРИЙ

А.В. ЗАБОЕВА, А.А. СИМОНЕНКО, А.С. КОВАЛЕВСКАЯ, М.И. СЕМЕНОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Пластик встречается повсеместно в современном мире, и объемы его производства только растут. Полимерные материалы окружают нас повсюду, в том числе и в быту. В окружающую среду попадает большое количество пластиковых отходов, которые имеют долгий срок разложения, и накапливаются в экосистеме, особенно много пластика в водной среде. Чтобы выяснить, какое воздействие могут оказывать отходы полимерных материалов на окружающую среду, необходимо провести анализ токсичности различных полимеров. Исследование токсичности отходов полимерных материалов производится с помощью биотестирования с использованием в качестве тест-организмов простейших и люминесцентных бактерий.

**Ключевые слова:** *оптический контроль, биотехническая система, биотестирование, токсичность, оценка токсичности среды, отходы полимерных материалов.*

Пластмассы, они же пластики — органические материалы, состоящие из высокомолекулярных соединений природного или синтетического происхождения,

известных как полимеры, которые состоят из звеньев-мономеров. Это первый в мире материал по распространению и использованию из-за дешевизны и простоты производства, и потому используется во многих сферах жизни. По данным исследований, на 2022 год доля пластика среди бытовых отходов составляет до 10%. [2]. Также изделия из пластика имеют долгий срок разложения и по большей части не поддаются биологическому разложению [2], а в будущем размеры потребления и производства пластиковых изделий будут только увеличиваться отчего проблема утилизации пластиковых отходов является одной из первостепенных задач для экологов.

Пластик не относится к опасным отходам, но может содержать различные токсичные добавки-пластификаторы, которые могут выделяться в окружающую среду [3]. Часть пластика попадет в гидросферу, где распадется на более мелкие фракции, относимые к микропластику [3]. Из-за большей поверхности частиц, соприкасающейся со средой, облегчается выщелачивание веществ-пластификаторов, которые затем попадают в пищеварительную систему морских организмов и передвигаются выше по пищевой цепи, доходя таким образом до человека [3].

В рамках нашего исследования было рассмотрено несколько распространенных видов пластика, которые используются в быту. Целью исследования являлось установление степени этих видов пластика. Первым из них является полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ). Это термопластик из класса полиэфиров, который занимает первое место по использованию среди других видов пластика. Он используется для производства емкостей для воды, текстильных волокон, электрических изоляций и др.

Помимо ПЭТ были рассмотрены также полиамид, пластик, созданный из синтетических высокомолекулярных соединений, которые содержат в основной цепи амидные группы  $-CONH-$ . Он используется в текстильной промышленности, для изготовления пленок различного назначения, деталей различных машин и оборудования, изолирующих элементов и труб. Полиамид может представлять опасность здоровью человека из-за пластификаторов, которые входят в его состав. Часто в роли таких пластификаторов выступают бисфенол А или С и фталаты (соли фталевой кислоты), бензолсульфокислоты.

Также нами был рассмотрен такой материал, как фторпласт. Это фторсодержащий полимер, который используется для изготовления изолирующей обмотки токопроводящих кабелей и для других нужд электропромышленности.

Исследование токсичности перечисленных выше видов пластика проводилось с помощью метода биотестирования. Суть метода состоит в определении токсичности анализируемого объекта или среды по регистрируемой реакции тест-организмов в стандартных условиях. Реакцией тест-объектов могут выступать изменения поведенческих, физиологических и биохимических показателей. Для исследования были выбраны два тестобъекта: инфузория-туфелька (*Paramecium caudatum*) и люминесцентные бактерии Эколюм.

В качестве объекта исследования были выбраны такие отходы, как бутылки из ПЭТ марки «Красная цена», причем представленные в виде крупной фракции, размеры которой составляли от 1 до 2 см, и мелкой фракции, размеры которой достигали 0,5 мм; бутылки из ПЭТ марки «Святой источник»; отходы материалов из фторпласта и отходы материалов из полиамида. Согласно методике [5], из отходов получали водные вытяжки из навесок. Для того, чтобы отследить динамику изменений токсичности водной среды,

в которую попали пластиковые отходы, исследования проводились для отходов, через два часа пребывания в воде и через двадцать четыре часа пребывания в воде.

При проведении исследований использовались критерии оценки степени токсичности пробы, основанные на отклике тест-объектов, которые приведены таблице 1.

Таблица 1

**Критерии оценки степени токсичности исследуемой пробы**

Тест-объект	Значение индекса токсичности	Степень токсичности
Инфузории-туфельки ( <i>Paramecium caudatum</i> )	0,0 — 0,4	Допустимая токсичность
	0,4 — 0,7	Умеренная токсичность
	0,7 и выше	Высокая токсичность
Эколюм	Меньше 20	Допустимая токсичность
	20 — 50	Образец токсичен
	50 и выше	Высокая токсичность

Результаты, полученные после проведения экспериментов через два часа пребывания отходов в воде, представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Результаты экспериментов для пластиковых отходов после двух часов экстрагирования в воде**

Вид пластика	ПЭТ «Красная цена», размеры до 2 см	ПЭТ «Красная цена», размеры до 0,5 мм	ПЭТ «Святой источник»	Полиамид	Фторпласт
Степень токсичности ( <i>Paramecium caudatum</i> )	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая
Степень токсичности (Эколюм)	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая

По результатам экспериментов можно сказать, что при исследовании токсичности с использованием *Paramecium caudatum* ни один из видов пластика не проявил токсичность, которая превысила бы допустимый уровень. А при исследовании на люминесцентных бактериях ни одна проба пластика не оказалась токсичной.

Далее интервал наблюдения был увеличен. Для этого исследуемый пластик экстрагировался в воде в течение 24 часов. Полученная водная вытяжка исследовалась аналогично предыдущему этапу. Результаты, полученные после проведения экспериментов, представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Результаты экспериментов для пластиковых отходов после двадцати четырех часов экстрагирования в воде**

Вид пластика	ПЭТ «Красная цена», размеры до 2 см	ПЭТ «Красная цена», размеры до 0,5 мм	ПЭТ «Святой источник»	Полиамид	Фторпласт
Степень токсичности ( <i>Paramecium caudatum</i> )	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Допустимая
Степень токсичности ( <i>Эколюм</i> )	Допустимая	Допустимая	Допустимая	Образец токсичен	Допустимая

По результатам проведенных экспериментов можно сказать, что при исследовании токсичности с помощью *Paramecium caudatum* также, как и в предыдущем опыте, ни один из видов пластика не проявил токсичность, которая превысила бы допустимый уровень, и динамики изменения также не прослеживается. При исследовании на люминесцентных бактериях индекс токсичности у всех проб несколько возрос, но токсичной оказалась только проба полиамида. Это может быть связано с выщелачиванием пластификаторов, в роли которых могут выступать бисфенолы или фталаты, что повышает индекс токсичности исследуемой пробы.

После проведения исследований можно сделать вывод, что пластиковые отходы, пребывавшие в воде в течение двух и двадцати четырех часов, не проявили токсического воздействия на и *Paramecium caudatum*, и токсичность всех проб не превысила порогового значения. Также пробы отказались нетоксичными для люминесцентных бактерий, кроме полиамида, токсичность которого возросла через двадцать четыре часа и превысила допустимый уровень. Полученные результаты доказывают, что пластик может оказывать негативное воздействие на окружающую среду, в частности, на экосистему водоема, при длительном пребывании в ней.

**Список литературы**

1. Потапова Е.В. Проблема утилизации пластиковых отходов // Известия Байкальского государственного университета, вып. 28 (4). — 2018. С. 535–544.
2. Меньшикова Е.А. Токсичные загрязнители из пластиковых отходов // Лучшие научные исследования 2022: сборник статей IV Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 20 февраля 2022 г. / МЦНС «Наука и Просвещение», г. Пенза, 2022, С. 16–19.
3. Негативное влияние микропластика: системы-мишени организма человека / Ермачкова П. А., Кравченко А.Н., Залата О.А. // Мотивационные аспекты физической активности: тез. Докл. V Всероссийской междисциплинарной конференции, Великий Новгород, 26 февраля 2021 г. / Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород. — 2021, С. 23–28.
4. Булгаков Д.А., Санкова Е.А. Вред пластика на примере полиэтилентерефталата / Геоэкологические проблемы современности и пути их решения: тез. Докл. II Всероссийской научно-практической конференции, Орел, 22 мая 2020 г. / ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орел, 2020, с. 114–122.
5. ФР.1.39.2015Л9244. Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». ООО «Спектр-М», 2015.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОБОПОДГОТОВКИ ДЛЯ КОНЦЕНТРАТОМЕРА БИОТЕСТЕР-2М

А.В. ГЕРАСИМОВ, А. СОКОЛОВ, А. С.КОВАЛЕВСКАЯ, А.А СКОСЫРСКАЯ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Метод оценки токсичности водных сред с помощью концентратомера Биотестер-2М является широко востребованным в экотоксикологических лабораториях поскольку позволяет проводить быструю и точную оценку токсичности. Однако процедура пробоподготовки является сложной процедуры и в настоящее время требует автоматизации процесса наслаивания в фотометрическую кювету. В работе предполагается провести серию испытаний нового мобильного устройства для автоматизации процесса пробоподготовки и проанализировать возможность его внедрения.

*Ключевые слова:* биотестирование, наслаивание(наслоение), пробоподготовка, автоматизация.

**Биотестирование** — процедура установления токсичности среды с помощью тест-объектов, сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у тест-объектов. Благодаря простоте, оперативности и доступности биотестирование получило широкое признание во всем мире и его все чаще используют наряду с методами аналитической химии.[1]

Проведение процедуры пробоподготовки является достаточно трудоемким процессом, в частности процесс наслаивания растворов для получения видимой границы. Зачастую это требует хорошей подготовки лаборанта, проводившего пробоподготовку, включающую процесс наслаивания, который и вызывает дискомфортное проведение данной процедуры.

Ряд факторов оказывают воздействие на здоровье лаборантов, проводивший часы за работой и являются следствием возникновения профессиональных болезней.

**Профессиональные болезни** — заболевания, возникающие в результате воздействия на организм профессиональных вредностей.

На подготовку одной кюветы (наслоение) требуется около 5 минут. Наслоение 15 кювет, включая тестовые для анализа, занимает около часа, при этом лаборант занимает крайне неудобное положение для получения наилучшего результата.

Проведение биотестирования лаборантом относится к 4 группе профессиональных болезней, что влечет за собой ряд заболеваний, носящие накопительный характер и сказывающиеся в дальнейшем на здоровье рабочего.

Близорукость, дальнозоркость, расфокусированное зрение также являются профессиональными рисками работников-лаборантов.

Затуманенное зрение — самый распространенный офтальмологический симптом. Чаще всего оно представляет собой постепенное снижение четкости зрения и связано со снижением его остроты.[2]

Усиление рисков происходит благодаря неудобной позе рук и тела, в частности изменение ЦНС, сосудистой (из-за сидячего положения и положения руки).

Другая проблема — это напряжение, которое получает тело и спина во время сидячей работы. Регулярное нахождение в сидячем положении более двух часов подряд чревато последствиями для опорно-двигательного аппарата: мышечные спазмы, боли в спине, искривление позвоночника, остеохондроз и другие заболевания.

В результате проведенного анализа было выяснено, что среднее время, потраченное лаборантом на достижение успешного результата 5,3 минуты при условии образования видимой человеческому глазу границы ПВС. Однако, время проведения пробоподготовки может увеличиваться из-за полученных проб, которые не удовлетворяют требованиям в связи с нарушенной видимой границей. Усредненное время таких неудачных попыток составило 3,4 минуты. Следовательно, на процесс наслаивания должно уходить более 5 минут при условии того, что лаборант во время этого действия будет испытывать накопительный дискомфорт.

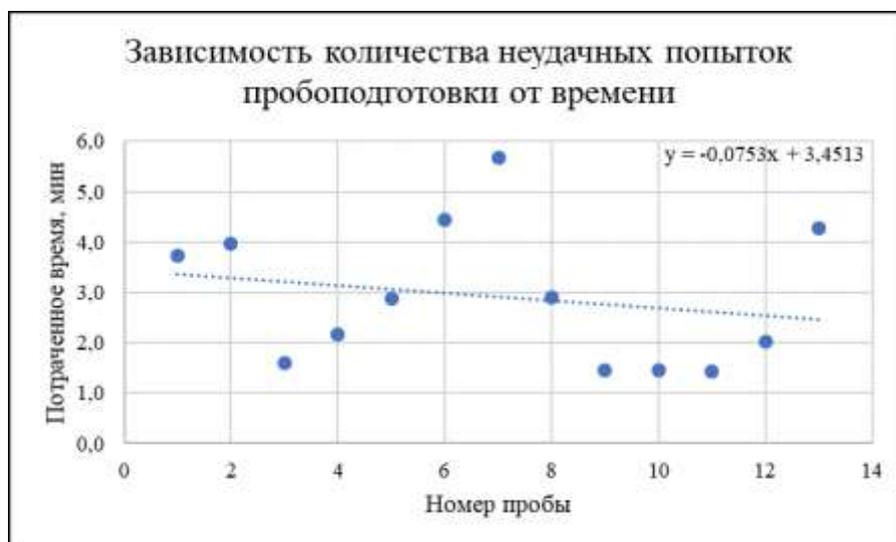
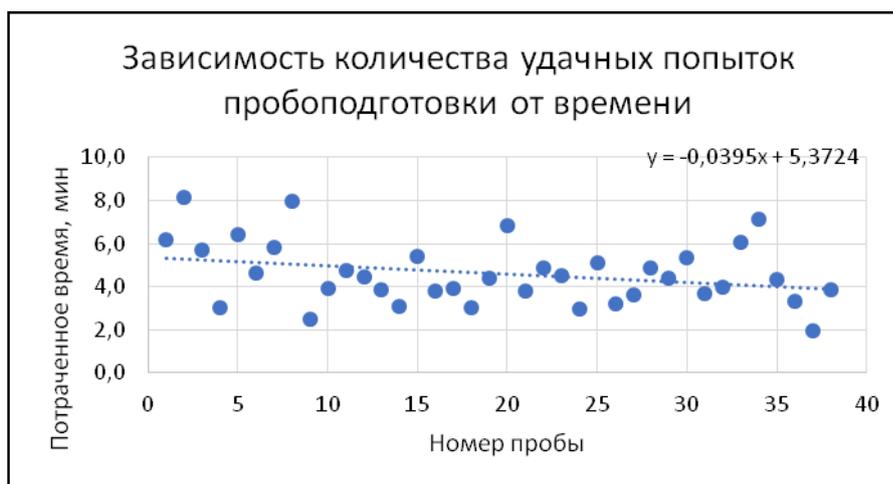


Рис. 1,2. Графики зависимости результата наслаивания от времени.

В результате опроса лаборантов, участвующих в исследовании были выявлены основные жалобы, которые были следствием проведения процесса наслаивания в фотометрическую кювету вручную. Основными из них были неприятные ощущения, связанные с долгим нахождением тела в статичном положении.

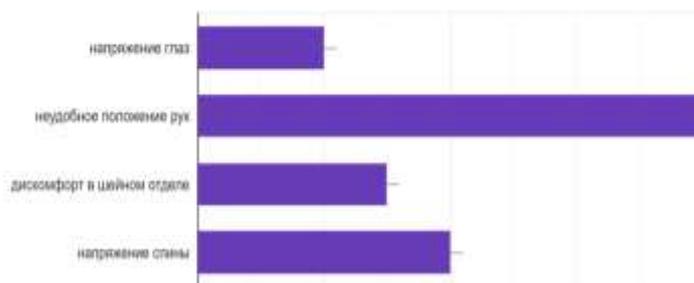


Рис. 3. Основные жалобы лаборантов.

На кафедре ИЗОС СПбГЭТУ «ЛЭТИ» было разработано устройство автоматизирующее процесс наслаивания, этим самым упрощая работу лаборанта, проводящего процедуру пробоподготовки.

Устройство представляет собой мобильное малогабаритное устройство, предназначенное для подготовки пробы (проведения процесса наслаивания) в фотометрическую кювету для дальнейшего исследования на приборе «Биотестер 2М», не использующее специальное ПО и способное обеспечить чистоту пробы, соответствующую без использования специальных средств. На данный момент устройство не является полностью опробованным и прошедшим анализ на выполнение заявленных разработчиком требований.

В дальнейшем планируется анализ работоспособности, необходимая модернизация устройства, возможность совмещения автоматизированной системы и «Биотестера-2М».

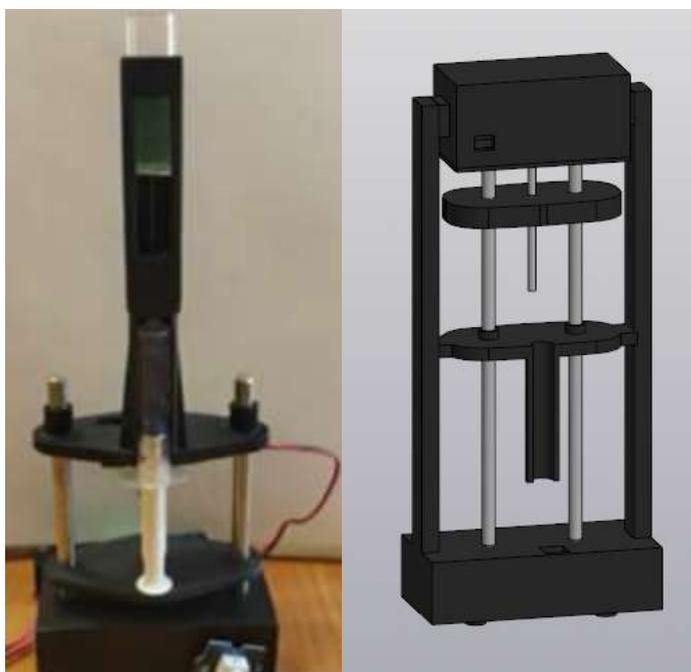


Рис. 4,5. Прототип автоматизированного устройства для пробоподготовки и макет его усовершенствованной версии.

Для возможности ввода в эксплуатацию устройства стояла задача проверки заявленных технических задач. Наслаивание проводилось с использованием для каждой исследуемой среды (среда Лозина-Лозинского (Л-Л) в составе: на литр дистиллированной воды 0,1 г — NaCl; 0,01 г — KCl; 0,01 г — MgSO<sub>4</sub>; 0,01 г — CaCl<sub>2</sub>; 0,02 г — NaHCO<sub>3</sub>; ацетон, водный раствор массовой долей 1%; слабый раствор 0,1% (1,5 г на 10 л

дистиллированной воды) перманганата калия  $\text{KMnO}_4$ ) три вида концентраций ПВС (5%, 6%, 7%) с целью выявления критерий и сред, наиболее подходящих для использования оборудования.

Результатом наибольшего количества удачных попыток стали 7% концентрация ПВС и используемый в качестве исследуемой среды слабый раствор перманганата калия, показавшие в сравнение с другими наилучшие результаты. Что является выводом того, что устройство способно провести заявленные действия при определенных условиях.

Проведенный ряд испытаний устройства выявил основные факторы, влияющие на положительный исход процесса.

1. **Герметичность.** В результате частых исследований герметичность нижнего отверстия кюветы нарушается за счет постоянного прокалывания герметика и возможности неидеального попадания в одно и то же место иглой. Для такого случая предусмотрена клейкая лента, но она является лишь сдерживающим фактором. После каждого использования кюветы ее необходимо промывать водой и специальными средствами, что является причиной изнашивания ленты и необходимостью в периодическом подклеивании ее или замены.

2. **Пропускание пузырьков воздуха.** При заполнении шприца взвесью инфузорий и ПВС часто наблюдалось явление попадания пузырьков воздуха, скапливающихся на стенках шприца, которые тормозили процесс подготовки к автоматизированному наслаиванию.

3. **Сложности установки кювет и фиксации шприца.** В процессе установки шприца возникла проблема того, что, при помещении его в специальный отсек, лаборантам приходилось прикладывать усилия, вставляя его в предназначенное место. Шприц с иглой необходимо вставлять таким образом, чтобы при установке игла не слетела, в противном случае есть риск погнуть кончик или ставить иглу на место через отсек для кюветы, что крайне неудобно и времязатратно.

Извлечение кюветы иногда проблематично из-за неверно спроектированных внутренних стенок отсека, что является причиной застревания кюветы.

4. **Необходимость замены шприца.** Для каждого нового исследования предназначается новый шприц, который, скорее всего, будет подлежать утилизации, так как промывка его достаточно трудна. Также будет необходима дополнительная кювета или ёмкость для подготовки взвеси инфузорий и ПВС.

5. **Разница во времени.** Процесс наслаивания материала от нажатия кнопки «ПУСК» до извлечения пробы занимает порядка 1,5 минут, однако, на попытки установки кюветы в верное положение, попадание иглой в отверстие на дне кюветы, фиксацию шприца, возвращение иглы в перпендикулярное положение, может потребоваться дополнительное время, которое лаборант тратит при пробоподготовке.

В результате были пересмотрены основные критические моменты и предложен альтернативный точно рассчитанный чертеж усовершенствованной версии устройства, предполагающий исправление недостатков предыдущей версии.

### Список литературы

1. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / Ред. Мелехова О.П., Сарапульцева Е. И. — 3-е изд., М.: Издательский центр «Академия». 2010, 288 с.
2. Гайнуллина М.К., Якупова А.Х., Валеева Э.Т., Каримова Л.К., Галимова Р.Р. Профессиональные риски здоровью работников.

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ СТАНЦИИ ПО СОРТИРОВКЕ И ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ

Е.В. Зимин, К.А. Порохненко, Я.А. ХВАЩЕВСКАЯ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Проблема утилизации и сортировки отходов стоит очень остро и является актуальной в наше время. Для решения проблемы постоянного роста объемов не перерабатываемых отходов необходимо создание эффективных перерабатывающих станций. Мобильные станции по переработке отходов позволят значительно снизить нагрузку и объемы отходов, поступающих на перерабатывающие заводы и полигоны.

**Ключевые слова:** *правильная утилизация, мобильная станция по переработке отходов, вторичное использование материалов.*

Необходимо создать перерабатывающую станцию, которая будет качественно и правильно выполнять свою задачу, не наносить ущерба экологии, иметь адекватные габариты и быть простой в использовании, а также экономичной.

В настоящее время в России существует несколько вариантов «мини-заводов» по переработке отходов и несколько вариантов мобильных перерабатывающих станций.

«Мини-заводы» по переработке отходов способны обрабатывать все виды отходов, в зависимости от оборудования. Преимущества такого комплекса заключаются в том, что он способен перерабатывать большие объемы отходов.

В зависимости от оснащенности и возможностей различного технологического оборудования такие «мини-заводы» могут перерабатывать практически все классы отходов.

Мобильные станции по переработке отходов, в свою очередь, могут утилизировать несколько видов отходов одновременно или быть специализированными для определенного вида отходов (класса отходов).

Преимуществом мобильной станции по переработке отходов является ее простота и относительная компактность, в ней нет ничего лишнего и ее функции четко направлены на выполнение возложенной на нее задачи.

Поскольку установка включает в себя небольшое количество компонентов оборудования, ее легко отремонтировать. Становится легче найти дефекты или поломки.

Первый вопрос, который возникает на этапе разработки это то, что именно должна перерабатывать наша станция. Мобильная станция должна быть универсальной, то есть способной перерабатывать наиболее распространенные виды отходов. Например, пластик.

Задача состоит в том, чтобы создать такую мобильную перерабатывающую станцию, которая будет выполнять свои функции эффективно и регулярно, не нанося ущерба окружающей среде и имея небольшие габариты.

Также мусороперерабатывающая станция должна иметь низкую стоимость, чтобы ее использование могло быть широко распространено, таким образом можно добиться снижения роста накопления не переработанных отходов.

Прежде чем приступить к проектированию установки, необходимо изучить оборудование, которое используется для переработки отходов, и понять, какое именно оборудование должно присутствовать на нашей станции по переработке отходов.

На начальном этапе нужно понять, что нужно использовать в разработке.

Итоговый вид перерабатывающей станции представлен на рис. 1.

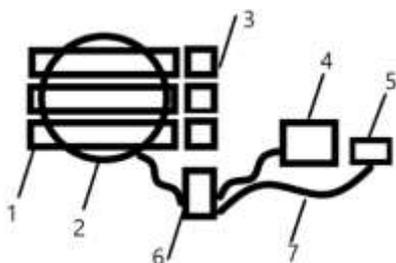


Рис. 1. Схема мобильной станции по переработке.

На рисунке представлены следующие обозначения: 1 — три параллельных горизонтальных ленточных конвейера, 2 — область работы нейросетевого сортировщика, 3 — три контейнера для отсортированных отходов, 4 — измельчитель (дробилка), оборудование по созданию пластиковой нити, 6 — пульт управления установкой, 7 — соединительные провода.

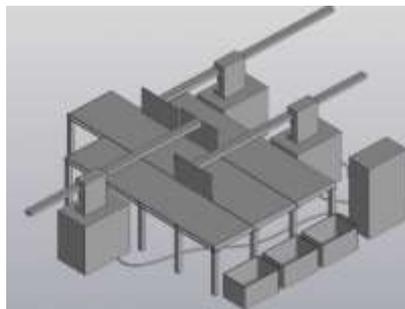


Рис. 2. Модель установки в системе САПР.

Принцип работы такой установки прост.

На три параллельных горизонтальных ленточных конвейера (1) поступают отходы, которые необходимо отсортировать и переработать.

В области работы ИИ (2) с помощью подвижных щупов производится сортировка отходов, по необходимым параметрам, например, на пластик PET, PP и HDPE.

Т.е. щупы распределяют поступающие отходы по трем конвейерам таким образом, чтобы на первом конвейере по итогу оказались отходы только из PET пластика, на втором из PP, а на третьем из HDPE соответственно. Они все попадают в контейнеры для хранения. По итогу получается три контейнера с отсортированными отходами.

Контейнеры предназначены для хранения отходов, образующихся в процессе переработки.

В дальнейшем необходимо решить, что с этим классом отходов необходимо сделать. Например, измельчить. Измельчение облегчает дальнейшую транспортировку, переработку и использование отходов в качестве вторичного сырья.

### Список литературы

1. Булавин Л. А., Выгорницкий А. В., Лебовка А. И. Компьютерное моделирование физических систем. Долгопрудный: Изд-во «Интеллект», 2011. — 352 с.
2. Никитин В. С. Технологии будущего. М.: Техносфера, 2010. — 264 с.
3. Kumar RGP. Мехатронное проектирование системы сортировки макулатуры для эффективной переработки // Диссертация магистра наук по специальности «Машиностроение». Ун-т штата Сев. Каролина, Роли, Сев. Каролина. 2007.

## СЕКЦИЯ ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ВТ

### SEVERAL ASPECTS ON IMPLEMENTATION OF LOCK-FREE ATOMIC SNAPSHOT FOR HIGH-PERFORMANCE COMPUTING IN MPI REMOTE MEMORY ACCESS MODEL

NAVEEN, ALEXEY A. PAZNIKOV

*Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU «LETI»*

**Abstract.** In this paper, we present the lock-free atomic snapshot for High-Performance Computing in MPI RMA model. An Atomic Snapshot is useful for remote memory access where different processes have access to the concurrent data structure. Applications of atomic snapshot building multi-writer registers from single-writer registers, radar tracking system, counters, accumulators, check-pointing and concurrent backups, etc. Snapshots also useful for monitoring the parallel systems. An Atomic snapshot contains two operations update and scan. In update processor writes the content to associated location and scan gives the linearizable view of all n segments. This paper presents non-blocking atomic snapshot in which update used MPI\_Accumulate and MPI\_Compare\_and\_Swap atomic operations. In scan we used MPI\_Get\_accumulate operation for reading the register values atomically. System used for testing HPE Cray Ex Supercomputer.

*Keywords:* atomic snapshot, shared memory, MPI RMA, Compare and swap.

**Introduction:** An Atomic snapshot contains two operations update and scan [1]. In update processor writes the content to associated location and scan gives the linearizable view of all n segments [1]. Linearizability [4] is the fundamental requirement for designing the concurrent data structure. Past two decades authors expressed their view on atomic snapshot but mostly theoretical [2,3] work. In this paper we present the non-blocking atomic snapshot in MPI RMA model. In atomic snapshot memory, memory is partitioned into n parts, each partition for one processor, where each processor can write and all other processors can read the latest updated values. In the term of consistency guarantees 3 types of registers: Safe, Regular and Atomic [5].

In this algorithm, we used MPI\_Accumulate and MPI\_Compare\_and\_swap which are atomic operations. MPI\_Accumulate performs the atomic update and in this algorithm, we used MPI\_Op — MPI\_REPLACE in MPI\_Accumulate. In fig. 1, one-sided communication in MPI RMA processes can read and write on remote memory. In this paper, we design the single-writer multi-reader snapshot algorithm for MPI RMA model. Each process can update the value on the shared memory buffer also known as window buffer at only one position according to its rank as shown in fig. 2 and all processes can read this window buffer atomically. For update operation we used the MPI\_Accumulate and MPI\_Compare\_and\_swap atomic operations. MPI\_Accumulate provides atomic read-and-update operations.

In MPI RMA two types of synchronization calls: 1. Active target communication, 2. Passive target communication. In this paper, we used Active target communication synchronization call. In active target communication when data is moved from one process to another, both processes are involved in the communication [6].

For synchronization we used MPI\_Win\_fence. MPI\_Win\_fence is the simplest Active target synchronization. In Window all processes collectively call fence for synchronization.

Syntax of fence:

Beginning of epoch — `MPI_Win_fence(int assert, MPI_Win window);`  
 RMA operations — `MPI_Accumulate`, etc  
 End of epoch—`MPI_Win_fence(int assert, MPI_Win window);`

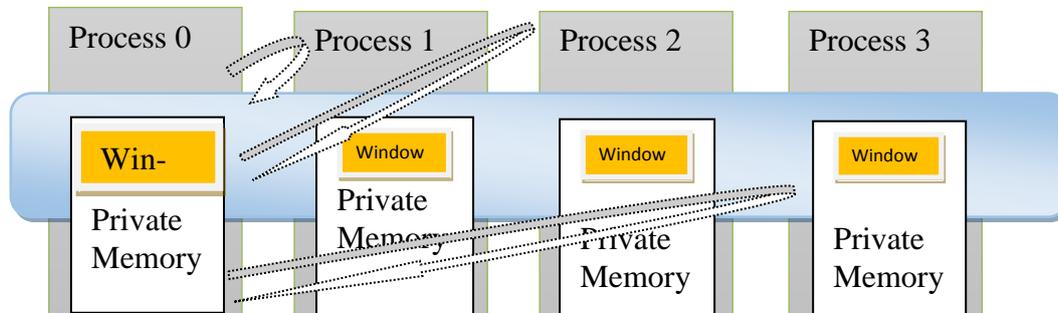


Fig. 1. One-sided communication.

Window buffer is shared array for all processes. In update operation each process updates its value according to window buffer position, if process 0 wants to update the window buffer array, then it will update at 0<sup>th</sup> position of the window buffer as shown in Fig. 2 and for process 1 window buffer's 1<sup>st</sup> position and so on until all processes finished update operation.

Window buffer ( $W\_b[0,1,2, \dots,n]$ ):

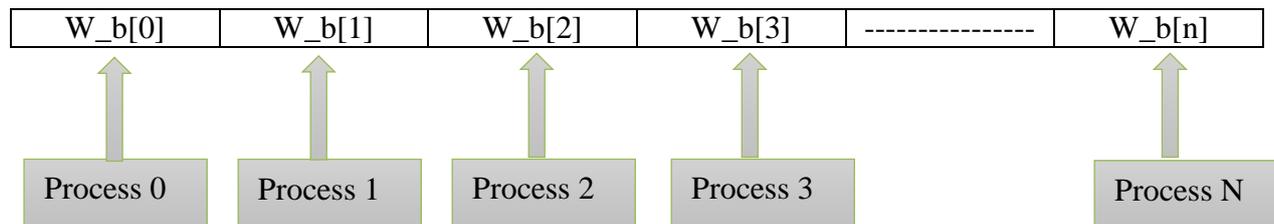


Fig. 2. Update operation by Processes.

**System Used for testing:** We used HPE Cray EX Supercomputer for testing the algorithm. System configuration mentioned in the Table 1.

Table 1

**System Configuration**

№	Model	HPE Cray EX Supercomputer
1	Distribution	SLES 15.1 1
2	CPUS	256
3	Memory	512 GB

Single Writer Multi Reader atomic snapshot Algorithm:  
`update(rank, size, window_buffer1, window_buffer2, window)`  
 begin  
 Integer: update=rank;  
 for i=0 to size-1  
 do

```

MPI_Accumulate(update , i , update*sizeof(int) , MPI_REPLACE, window);
If(window_buffer2[i] != window_buffer1[i])
MPI_Compare_and_swap(window_buffer2[i], window_buffer1[i]);
od;
end update;
scan(rank, size, window_buffer1, window_buffer2,window)
begin
for i=0 to size-1
do
MPI_Get_accumulate(window_buffer2[i], rank, i*sizeof(int), MPI_NO_OP, window);
od;
end scan

```

*Table 2*

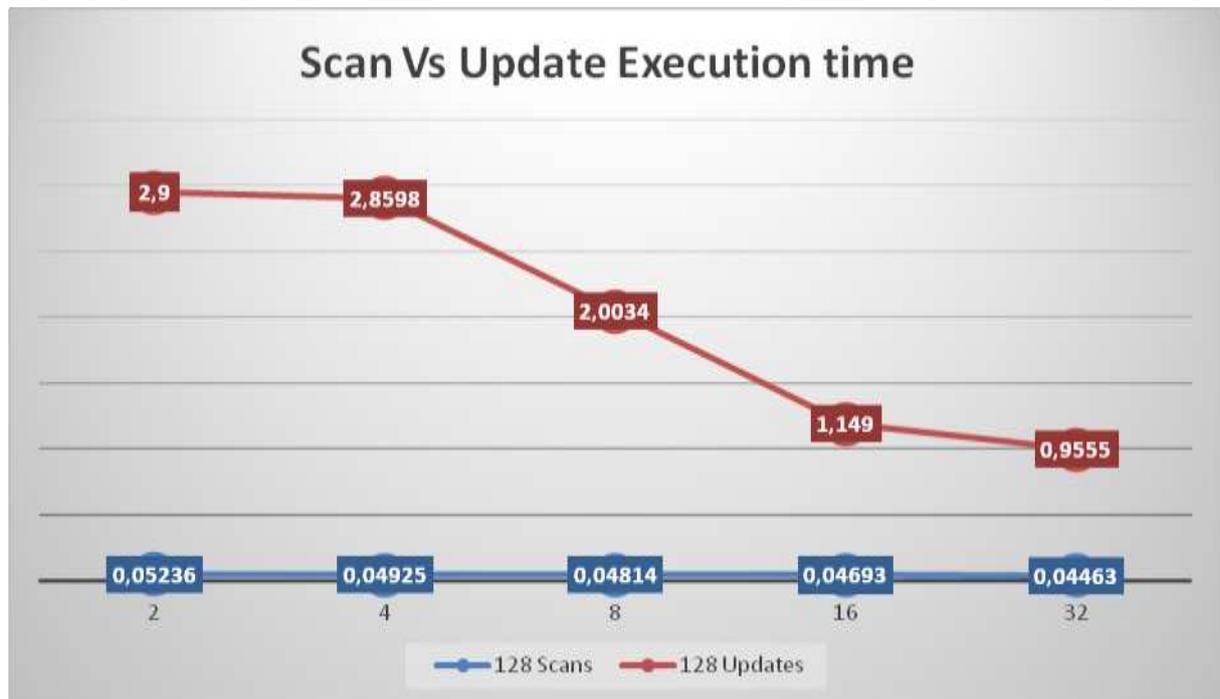
**Execution Time for 128 Scans**

No of Scans	No of Nodes	Execution Time(seconds)
128	2	0.05236
128	4	0.04925
128	8	0.04814
128	16	0.04693
128	32	0.04463

*Table 3*

**Execution Time for 128 updates**

No of Updates	No of Nodes	Execution Time(seconds)
128	2	2.9000
128	4	2.8598
128	8	2.0034
128	16	1.1490
128	32	0.9555



*Scan vs Update Execution time(s) over different Nodes.*

### Conclusion:

In this paper we present lock-free atomic snapshot for High Performance Computing in MPI RMA model. We designed the single-writer multi-reader algorithm where each process can update the assigned position for example Process 0 can update 0<sup>th</sup> position of shared memory and Process 1 can update 1<sup>st</sup> position of shared memory and so on. But all processes can read any position of the shared memory without locking. In future work we will design the lock-free multi-writer multi-reader atomic snapshot for High-Performance Computing in MPI RMA.

### References:

1. Riany, Y., Shavit, N., & Touitou, D. (2001). Towards a practical snapshot algorithm. *Theoretical Computer Science*, 269 (1-2), 163-201.
2. Afek, Y., Attiya, H., Dolev, D., Gafni, E., Merritt, M., & Shavit, N. (1993). Atomic snapshots of shared memory. *Journal of the ACM (JACM)*, 40(4), 873-890.
3. Abrahamson, K. (1988, January). On achieving consensus using a shared memory. In *Proceedings of the seventh annual ACM Symposium on Principles of distributed computing* (pp. 291-302).
4. Herlihy, M. P., & Wing, J. M. (1990). Linearizability: A correctness condition for concurrent objects. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, 12(3), 463-492.
5. Israeli, A., & Shaham, A. (1992, October). Optimal multi-writer multi-reader atomic register. In *Proceedings of the eleventh annual ACM symposium on Principles of distributed computing* (pp. 71-82).
6. MPI: A Message-Passing Interface Standard Version 4.0: page 593. URL: <https://www.mpi-forum.org/docs/mpi-4.0/mpi40-report.pdf> (Data access 10.05.2022).

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ИДАВАНГ АГРО ПО МОДЕЛЯМ НИТРИФИКАЦИИ И ДЕНИТРИФИКАЦИИ**

А.В. АНДРЕЕВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Представлено исследование модели нитрификации и денитрификации с целью установления применимости полученных параметров как к самим указанным моделям, так и к полной модели ASM1.

*Ключевые слова:* нитрификация, денитрификация, кислород, бактерии-нитрификаторы, гетеротрофы.

### **Введение**

В животноводческом комплексе ИДАВАНГ Агро, занимающимся выращиванием свиней есть потребность очистки стоков. Разумеется, система очистки на рассматриваемом производстве уже присутствует. Однако, несмотря на ее эффективность и оригинальное техническое решение она имеет недостаток — сразу же на начальных стадиях очистки от химических примесей в атмосферу здания предприятия выделяется аммиак. Данное явление негативно сказывается на самой технике, потому персоналу периодически приходится заниматься поиском проблемы и исправлять ее. Разумеется, из-за такого явления процессы могут встать и на предыдущих этапах. Подробнее сама система очистки описана в [1].

Следовательно, в качестве альтернативы, имеет смысл рассмотреть биологическую очистку стоков после этапа механической фильтрации, которая лишена данного недостатка.

### **Модель для исследования загрязнений предприятия**

В качестве базовой модели биологической очистки принимается модель активного ила 1 (Activated Sludge Model 1 или ASM1). В виду сложности ее математической модели имеет смысл для начала рассмотреть процессы нитрификации и денитрификации по отдельности.

Для рассмотрения моделей с предприятия были получены следующие данные:

$S_o^{вх} = 6 \text{ г/м}^3$  — входная концентрация растворенного кислорода,

$S_{nh}^{вх} = 30 \text{ г/м}^3$  — входная концентрация аммонийного азота,

$S_{no}^{вх} = 18.6 \text{ г/м}^3$  — входная концентрация нитратного азота

$S_{щел}^{вх} = 6.5 \text{ экв/м}^3$  — входное значение щелочности,

$V = 2700 \text{ м}^3$  — объем реактора.

Константы насыщения, гидролиза, распада, параметры фракций, коэффициенты прироста, максимальные удельные скорости роста, корректирующие факторы скорости роста веществ и бактерий были взяты из [2], который также применялся в качестве руководства по анализу моделей.

### Определение равновесных состояний модели нитрификации

Для начала установим, применимы ли полученные входные параметры к рассматриваемым моделям: согласно [2], у модели нитрификации существует два физически достижимых состояния равновесия. Первое состояние соответствует отсутствию очистки, параметры загрязнений при нем равны входным. То есть, очистка обеспечивается при неустойчивости данного состояния, для чего достаточно выполнения одного из трех условий:

- $S_o^{EX} > S_{o\ min}^{EX}$ ;
- $S_{nh}^{EX} > S_{nh\ min}^{EX}$ ;
- $Q^{EX} < Q_{max}^{EX}$ .

При имеющихся входных параметрах объекта и константах из [2] граничные значения следующие:

$$Q_{max}^{EX} = 1878.677 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$S_{o\ min}^{EX} = -0.18495 \text{ г}/\text{м}^3, \text{ при } Q^{EX} = Q_{max}^{EX};$$

$$S_{nh\ min}^{EX} = 30 \text{ г}/\text{м}^3, \text{ при } Q^{EX} = Q_{max}^{EX}.$$

Заметим, что  $S_{o\ min}^{EX} < 0$ , то есть  $S_o^{EX} > S_{o\ min}^{EX}$  всегда. Как было указано ранее, для неустойчивости первого состояния равновесия достаточно выполнения одного из условий. Таким образом, установлено, что параметры объекта при  $Q^{EX} \in (0; 1878.677] \text{ м}^3/\text{сут}$

обеспечивают возможность очистки для модели нитрификации.

Второе состояние равновесия при устойчивости соответствует очистке. Сама устойчивость определяется условием:  $S_{nh}^{EX} > S_{nh\ min}^{EX}$ . Как было отмечено ранее, при  $Q^{EX} = Q_{max}^{EX}$  модель находится на границе устойчивости:  $S_{nh\ min}^{EX} = 30 \text{ г}/\text{м}^3$ . Однако при  $Q^{EX} < Q_{max}^{EX}$  имеющаяся входная концентрация аммонийного азота всегда больше минимального значения: например, при  $Q^{EX} = 1800 \text{ м}^3/\text{сут}$  концентрация

$S_{nh\ min}^{EX} = 13.0625 \text{ г}/\text{м}^3$ . Таким образом, из установленного ранее промежутка входного расхода субстрата исключается его максимальное значение:  $Q^{EX} \in (0; 1878.677] \text{ м}^3/\text{сут}$

для обеспечения очистки.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МОДЕЛИ ДЕНИТРИФИКАЦИИ

Согласно [2], у модели денитрификации также существует два физически достижимых состояния равновесия. Первое состояние, аналогично состоянию равновесия при нитрификации, должно быть неустойчивым для обеспечения очистки. Для этого достаточно выполнения одного из четырех условий:

$$S_s^{EX} > S_{s\ min}^{EX};$$

$$S_{no}^{EX} > S_{no\ min}^{EX};$$

$$Q^{EX} < Q_{max}^{EX};$$

$$S_o^{EX} < S_{o max}^{EX}.$$

Отметим, что при попытке рассмотреть параметры  $Q_{max}^{EX}$  и  $S_{s min}^{EX}$  в виде системы алгебраических уравнений с применением имеющихся параметров получается следующая система функций:

$$Q_{max}^{EX} = \frac{-945.881 * S_{s min}^{EX} - 25110}{S_{s min}^{EX} + 15} \quad \#(1)\#$$

$$S_{s min}^{EX} = \frac{-15 * Q_{max}^{EX} - 25110}{Q_{max}^{EX} + 945.881} \quad (2)$$

При анализе данной системе можно прийти к выводу, что если  $Q_{max}^{EX} > 0$ , то  $S_{s min}^{EX} < 0$  и наоборот. Данное явление объясняется самими уравнениями: так, чтобы  $Q_{max}^{EX} > 0$  согласно уравнению (1) необходимо, чтобы  $S_{s min}^{EX} > -26.547$ , а чтобы  $S_{s min}^{EX} > 0$  согласно уравнению (2) необходимо соблюдение условия  $Q_{max}^{EX} > -1674$ , также согласно уравнениям (1) и (2)  $Q_{max}^{EX} \neq -945.881$  и  $S_{s min}^{EX} \neq -15$ , из-за чего невозможно достичь состояния, при котором и  $Q_{max}^{EX} > 0$ , и  $S_{s min}^{EX} > 0$ . Таким образом придется подобрать параметр загрязнения  $S_s^{EX}$ , который выше ПДК. Пусть  $S_s^{EX} = 100 \text{ г/м}^3$ .

Теперь, используя параметры перейдем к нахождению граничных значений. Для начала найдем максимальный объем:  $Q_{max}^{EX} = -1040.8529 \text{ м}^3/\text{сут}$ , видно, максимальный объем отрицателен, что соответствует системе из уравнений (1) и (2). Следовательно, невозможно добиться выполнения условия  $Q^{EX} < Q_{max}^{EX}$ . Примем  $Q^{EX} = 1800 \text{ м}^3/\text{сут}$ ,

удовлетворяющее процессу нитрификации, для расчета иных параметров. Таким образом:

$$S_{s min}^{EX} = -18.9775 \text{ г/м}^3;$$

$$S_{no min}^{EX} = -18.4536 \text{ г/м}^3;$$

$$S_{o max}^{EX} = 0.684645 \text{ г/м}^3.$$

Поскольку  $S_s^{EX} > S_{s min}^{EX}$  всегда при имеющихся значениях, то первое состояние равновесия неустойчиво. Отметим, что  $S_{o max}^{EX} = 0.684645 \text{ г/м}^3$ , когда  $S_o^{EX} = 6 \text{ г/м}^3$ .

Для устойчивости второго состояния равновесия необходимо выполнение условия:  $S_{no}^{EX} > S_{no min}^{EX}$ , как было установлено, при  $Q^{EX} = 1800 \text{ м}^3/\text{сут}$  минимальная концентрация

$S_{no min}^{EX} = -18.4536 \text{ г/м}^3$ . То есть  $S_{no}^{EX} > S_{no min}^{EX}$  всегда.

### Получение и интерпретация результатов

Проведем моделирование систем нитрификации и денитрификации при помощи программного пакета MATLAB. Все моделирования проводились при начальных условиях, означающих сухую загрузку ила в реактор ( $X_{ba0} = X_{bh0} = 0.01$ ,  $X_{s0} = 0.0001$ ) и присутствие щелочности размером 6.5ph. Для нитрификации результаты моделирования представлены на рисунке 1 при  $Q^{EX} = 1800 \text{ м}^3/\text{сут}$  и при  $Q^{EX} = 900 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Моделирование на рис. 1 (слева) показывает, что при  $Q^{EX} = 1800 \text{ М}^3/\text{СУТ}$  минимальное значение входной концентрации аммонийного азота  $S_{nh}^{EX} = 13.0625 \text{ Г}/\text{М}^3$ .

Если входная концентрация этого значения ниже, то концентрации бактерий-нитрификаторов убывают со временем и очистка не производится. Если входная концентрация аммонийного азота выше минимального, то бактерии-нитрификаторы растут.

Моделирование на рис. 1 (справа) показывает, что при  $Q^{EX} = 900 \text{ М}^3/\text{СУТ}$  минимальное значение входной концентрации аммонийного азота  $S_{nh}^{EX} = 0.939655 \text{ Г}/\text{М}^3$ . Однако, как можно заметить, из-за более быстрой скорости реакции, в отличие от моделирования на рис. 1, при превышении минимальной входной концентрации аммонийного азота видно, как бактерии-нитрификаторы влияют на растворенный кислород, поскольку они существуют, питаются им.

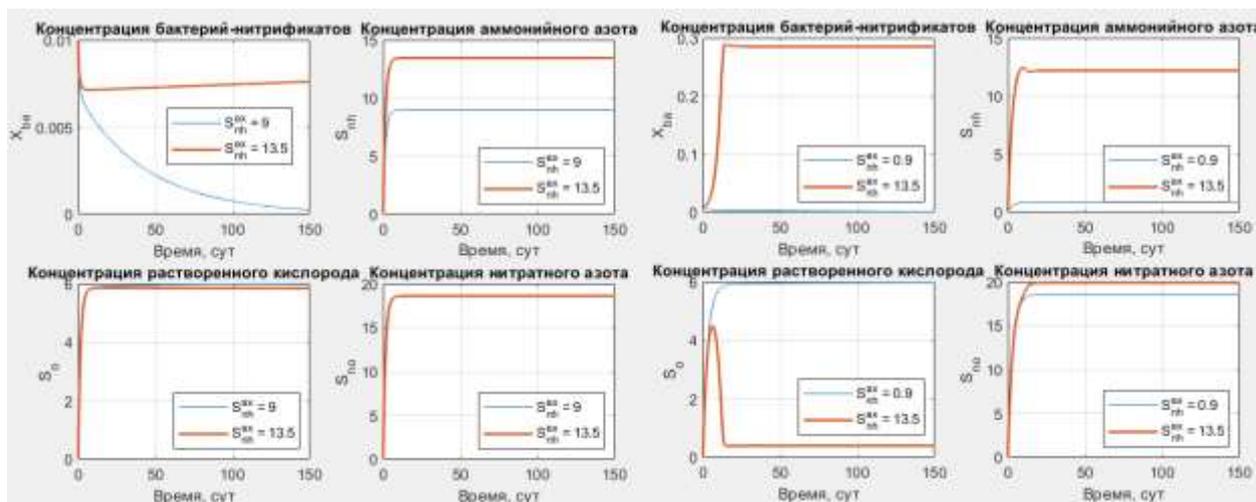


Рис. 1. Процессы нитрификации при  $Q^{EX} = 1800 \text{ М}^3/\text{СУТ}$  (слева) и при  $Q^{EX} = 900 \text{ М}^3/\text{СУТ}$  (справа)

Для денитрификации результаты моделирования представлены на рис. 2.

**Примечание:** РБРОВ — Растворенное Биологически Разлагаемое Органическое Вещество. На рисунке видно, что при текущей входной концентрации кислорода ( $S_o^{EX} = 6 \text{ Г}/\text{М}^3$ ) невозможно обеспечить очистку, поскольку данная концентрация выше  $S_{o\max}^{EX} = 0.684645 \text{ Г}/\text{М}^3$ , потому биомасса гетеротрофов не растет. Хотя, как было установлено:  $S_s^{EX} > S_{s\min}^{EX}$  и  $S_{no}^{EX} > S_{no\min}^{EX}$  при принятых значениях, то есть первое состояние равновесия неустойчиво, а второе устойчиво. Однако, как оказалось при моделировании — максимальная входная концентрация кислорода влияет на возможность очистки в модели денитрификации, как можно видеть при  $S_o^{EX} = 0.6 \text{ Г}/\text{М}^3$  — гетеротрофы растут. В результате чего концентрации нитратного азота, РБРОВ и аммонийного азота понижаются, что связано с тем, что гетеротрофы питаются РБРОВ, нитратным и аммонийным видами азота. Таким образом, очистка в модели денитрификации при постоянном объеме в основном управляется изменением максимальной входной концентраций кислорода.

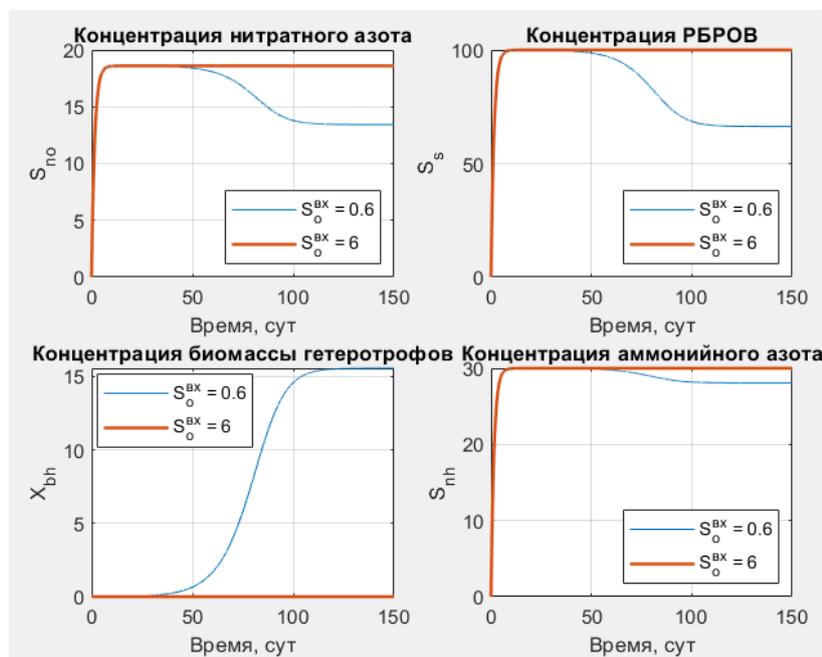


Рис. 2. Процессы денитрификации при  $Q^{BX} = 1800 \text{ м}^3/\text{сут}$

Поскольку было установлено, что на очистку критически влияет кислород, то примем  $S_o^{BX} = 0.6 \text{ г}/\text{м}^3$  и рассчитаем граничное значение входного расхода субстрата:

$$Q_{max}^{BX} = 2067.32401 \text{ м}^3/\text{сут}$$

Таким образом, промежуток допустимых значений входного расхода субстрата для модели денитрификации, при котором возможна очистка:  $Q^{BX} \in (0; 2067.32401) \text{ м}^3/\text{сут}$ .

### Заключение

В результате анализа моделей нитрификации и денитрификации можно отметить, что очистка в модели нитрификации управляется изменением входной концентрации аммонийного азота, а бактерии-нитрификаторы питаются за счет кислорода и производят нитратный азот, в то время как очистка в модели денитрификации управляется изменением входной концентрации кислорода, а гетеротрофы питаются РБРОВ, аммонийным и нитратном азотом. В дальнейшем следует рассмотреть, насколько исследованные ограничения на рассмотренные две модели наследуются при практическом рассмотрении полной модели ASM1 и применить полученные выводы касательно того, как организмы питаются концентрациями и повышают их за счет производства других концентрации в двух отдельных моделях с целью управления взаимодействия этих организмов для реализации биологической очистки по полной модели ASM1.

### Список литературы

1. Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. // Ежегод. журн. — 2021.С. 008-011.
2. Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 231 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ОПУХОЛИ

О.А. ГРАФИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Статья посвящена исследованиям существующих математических моделей роста раковых клеток.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, рост опухоли.

Математика играет существенную роль в медицине. Математические модели и компьютерное моделирование используются для изучения раковых заболеваний. Математические модели помогают понять развитие и рост опухоли, с их помощью можно оптимизировать и персонализировать схемы лечения, прогнозировать эффективность методов лечения и их комбинаций. Математическое моделирование играет важную роль в исследованиях рака при анализе огромных объемов полученных данных, проверке различных гипотез, подтверждении экспериментальных наблюдений и изучении динамического поведения сложных систем.

Классические модели роста опухоли основываются на основе экспоненциального или логистического законов роста. Рассмотрим их подробнее.

Простейшей моделью описания роста опухоли является мальтузианская модель, названная так в честь английского экономиста и демографа Томаса Мальтуса.

Суть модели — экспоненциальный рост с постоянным темпом. Такая модель часто используется для описания темпов роста популяции одного вида. Модель имеет форму:

$$\frac{dV}{dt} = rV,$$

где  $V$  — объем опухоли,  $r$  — параметр роста,  $t$  — время. Такая модель предполагает неограниченный объем ресурсов.

В. Коллинз предложил свой вариант модели роста опухоли, которую назвал экспоненциальной [1]. Эта модель имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{dt} = rV^b, r > 0, b > 0,$$

где  $r$  — параметр собственного роста. Рост ускоряется с увеличением параметра  $b$ .

Также к экспоненциальным моделям относится модель Гомперца, названная в честь английского математика Бенджамина Гомперца. Модель представляет собой сигмовидную функцию, которая описывает рост как наиболее медленный в начале и конце периода. Представляя опухоль как скопление клеток в замкнутом пространстве и учитывая, что доступность питательных веществ ограничена, можно описать модель в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} = a e^{-\beta t} V, a > 0, \beta > 0,$$

где  $a$  — внутренний параметр роста, а  $\beta$  — параметр замедления роста. Данная модель была успешна использована для моделирования роста рака молочной железы и легких.

Экспоненциальные модели хорошо описывают рост опухоли в определенный промежуток времени. Но объем опухоли будет стремиться к бесконечности, если темп

роста будет оставаться положительным, что нереалистично. Объем может увеличиться только до определенного уровня, поскольку ресурсы, необходимые для роста клеток, ограничены. Динамику поведения опухоли при торможении роста можно описать логистическими функциями. Рассмотрим их ниже.

Карл Людвиг фон Бергаланфи, австрийский биолог, предложил уравнение, описывающее рост биологического организма. Эта модель, модифицированная для описания роста опухоли, основана на том, что рост опухоли пропорционален площади поверхности, поскольку питательные вещества проникают через поверхность, а гибель клеток пропорциональна размеру опухоли.

Уравнение имеет вид:

$$\frac{dV}{dt} = aV^{\frac{2}{3}} - bV,$$

где  $V$  — объем опухоли,  $a$  — параметр роста,  $b$  — параметр замедления роста. Объем опухоли будет стремиться к уровню насыщенности модели.

Пьер Франсуа Ферхюльст, бельгийский математик, ознакомившись с теорией Мальтуса, построил модель роста популяции в условиях ограниченности ресурсов и назвал её «логистической». Модель предполагает линейное уменьшение относительных темпов роста с увеличением численности и описана следующим уравнением:

$$\frac{dV}{dt} = aV \left( 1 - \frac{V}{K} \right),$$

где  $a$  — скорость роста,  $K$  — максимальный размер популяции, «емкость популяции».

В ситуации достаточного объёма ресурсов опухоль растет примерно экспоненциально; в противном случае экспоненциально убывает.

Модель Ричарда является расширением модели Ферхюльста и описана в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} = aV \left( 1 - \left( \frac{V}{K} \right)^\alpha \right),$$

где  $\alpha$  — положительная степень.

Эта модель ведет себя точно так же, как логистическая модель. Однако в этой модели система может быть стабилизирована быстрее.

Обобщенная логистическая модель может быть записана в виде:

$$\frac{dV}{dt} = aV^\alpha \left( 1 - \left( \frac{V}{K} \right)^\beta \right)^\gamma,$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  — неотрицательные показатели,  $a$  — параметр скорости роста. Из этой обобщенного уравнения можно вывести все модели, описанные выше, соответствующим образом выбрав значения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

Логистические уравнения хорошо описывают рост опухоли во многих наблюдаемых случаях и до сих пор эффективно используются.

Современные модели, как правило, более специализированные и создаются под конкретную локализацию раковой опухоли. Опухоли, в свою очередь, подразделяются на солидные и инвазивные.

Солидные опухоли имеют четкую локализацию, форму и границы. Рост солидной опухоли можно представить как экспоненциальное или геометрическое расширение.

Например, рассмотрим модель на основе клеточных автоматов [2]. Клеточные автоматы — это модели, которые позволяют описать тот же класс ситуаций, что и дифференциальные уравнения. В данной работе исследуется модель плоскоклеточного ороговевающего и неороговевающего рака. Плоскоклеточный рак возникает в тех местах, где присутствуют «плоские» клетки — в эпителии. Ороговевающий и неороговевающий рак различаются по степени агрессивности: опухоль с ороговеванием относительно медленно развивается и метастазирует, в то время как неороговевающий рак быстро разрушает ткани и метастазирует по всему организму.

В рассматриваемой модели авторами были разработаны три алгоритма клеточных автоматов для описания развития различных опухолей эпителиальных тканей: моделирование на тканевом уровне, где рассматривалась зависимость структуры опухоли от обеспеченности ресурсами, и моделирование на клеточном уровне, где рассматривалась модель роста опухоли, зависящая от концентрации питательных веществ в условиях ограниченного доступа, и мутационная модель, где число опухолевых очагов зависит от вероятности мутаций.

Полученные результаты в целом совпали с экспериментальными данными, за исключением небольшой погрешности.

Клеточные автоматы позволили авторам описать геометрическое распространение модели и алгоритмически описать поведения опухоли под воздействием различных факторов, несмотря на затрудненность обобщения и интерпретации полученных результатов.

Для примера модели, описывающую динамику роста злокачественной солидной опухоли, рассмотрим работу И.В. Жуковой и Е.П. Колпака [3]. В рассматриваемой модели учитываются три вида клеток: нормальные, делящиеся и погибшие. К делящимся относятся непрерывно делящиеся клетки опухоли. Модель представляет собой задачу Коши для системы дифференциальных уравнений и строится на следующих предположениях:

Отсутствует апоптоз у делящихся клеток.

Нормальные клетки в отсутствие делящихся размножаются по логистическому закону.

Делящиеся клетки оказывают ингибирующее влияние на нормальные клетки, погибшие клетки оказывают ингибирующее влияние на нормальные и делящиеся.

Как следует из анализа модели, концентрация погибших клеток непрерывно растет, концентрация делящихся клеток сначала растет, а затем начинает убывать. Концентрация нормальных клеток монотонно уменьшается. Полученная модель хорошо описывает динамику роста солидной злокачественной опухоли.

В качестве модели роста определенно локализованной раковой опухоли рассмотрим модель, созданную для описания роста раковой опухоли молочной железы [4]. Модель основана на экспоненциальной модели роста и состоит из системы линейных и нелинейных детерминированных уравнений. Отличием этой модели является то, что авторы учитывали не только рост самой модели, но и появление и рост её метастазов. «Естественная» скорость роста метастазов аналогична «естественной» скорости роста первичной опухоли и описывается экспоненциальным законом. Период появления первой метастатической опухолевой клетки совпадает с двадцатым удвоением первичной опухоли. Предложенная модель корректно описывает рост первичной опухоли, облегчает понимание периода возникновения и формирования вторичных отдаленных метастазов.

При сравнении с экспериментальными данными было выявлено, что модель обладает высокой предсказательной способностью.

Более сложную задачу представляет собой описание модели роста инвазивной опухоли. Инвазивная опухоль состоит из подвижных клеток, которые могут мигрировать. Инвазия — необходимое условие для развития метастазов. Соответственно, подход к моделированию инвазивной опухоли отличается от подхода к моделированию солидных опухолей, которые растут за счет клеточной пролиферации, и включает в себе клеточную подвижность.

Рассмотрим на эту тему модель с учетом дихотомии миграции и пролиферации [5]. Модель основана на следующих предположениях:

В случае избытка питательных веществ опухоль неограниченно возрастает. Когда концентрация питательных веществ падает ниже критического уровня, опухоль начинает перемещаться по ткани в поиске области с достаточно высоким уровнем питательных веществ для возможности пролиферации, если опухоль её не находит, то погибает.

Питательные вещества нужны в большей степени пролиферирующим клеткам.

Кровеносная сеть вокруг опухоли уже частично или полностью разрушена.

Приток метаболитов определяется диффузией от удаленных источников.

Данная модель изучает зависимость скорости роста/распространения инвазивной опухоли в зависимости от параметров модели. В первую очередь была рассмотрена зависимость скорости от клеточных параметров, таких как скорость деления и скорость гибели. Исходя из данной модели, скорость распространения инвазивной опухоли падает с увеличением скорости гибели ее клеток в областях с нехваткой кислорода, а скорость роста опухоли увеличивается пропорционально скорости деления её клеток.

Данная модель плохо описывается начальный этап роста опухоли, но хорошо учитывает микроокружение модели и предоставляет хорошую возможность для моделирования химиотерапии.

Рассматривая существующие математические модели роста опухоли, можно заметить, что в большинстве работ, включая классические модели, анализируется рост солидной опухоли. Сольдные опухоли имеют неизменный очаг воспаления, обладают низкой способностью к перемещению и растут в основном за счет деления клеток, что делает их удобным объектом для изучения.

### Список литературы

1. Collins V.P., Loeffler R.K., Tivey H. Observations on growth rates of human tumors. 76(5):988-1000. PMID: 13362715. 1956 г.
2. Калиничева М. М., Котин В. В., Писаренко Е. М. Моделирование роста опухоли эпителиальных тканей с использованием алгоритмов клеточных автоматов // Альманах клинической медицины. 2008 г. Т. 17, № 1. С. 179–182.
3. Жукова И.В, Колпак Е.П. Математическая модель солидной опухоли. // Естественные и математические науки в современном мире. 2013 г. №13. С. 18-25.
4. Тюрюмина Э.Я. Незнанов А.А. Объединенная математическая модель роста первичной опухоли и первичных метастазов рака молочной железы (IV стадия РМЖ). //Сборник трудов 39-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2015». — 2015 г. С. 38-51
5. Колобов А. В., Анашкина А. А., Губернов В. В., Полежаев А. А. Математическая модель роста опухоли с учетом дихотомии миграции и пролиферации. // Компьютерные исследования и моделирование. Т. 1. № 4. 2009 г. С. 415-422.

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В СОСТАВЕ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

М.А. ЛЬВОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной работе проводится анализ и исследование аппарата воздушного охлаждения (АВО), входящего в систему очистки природного газа методом абсорбционной осушки. Аппараты воздушного охлаждения широко используются в химической, нефтяной и газовой промышленности. Они обеспечивают процессы на различных этапах производства. На установке комплексной подготовки газа (УКПГ) АВО применяется для: охлаждения и конденсации паров в процессе регенерации абсорбента; охлаждения газа в процессе его подготовки к транспортировке; нагревания масла для обеспечения работы газоперекачивающих агрегатов. В данной работе будет исследован процесс охлаждения и конденсации паров АВО в составе ректификационной колонны (РК).

*Ключевые слова:* АВО — аппарат воздушного охлаждения; КМ — компьютерная модель; ММ — математическая модель; УКПГ — установка комплексной подготовки газа; РК — ректификационная колонна; СУ — система управления.

При составлении ММ теплообменных процессов в системе воздушного охлаждения были приняты следующие допущения:

- в конденсационных секциях среда движется в режиме идеального вытеснения;
- поперечное перемешивание считается идеальным. Данное допущение приводит к составлению одномерной модели, в которой учитывается динамическое распределение температуры только по длине конденсационных секций АВО;
- принимается, что теплообменный процесс сопровождается конденсацией насыщенного пара;
- ММ учитывает накопление теплоты в трубах конденсационной секции;
- трубы в конденсационных секциях выполнены с оребрением.

С учетом перечисленных допущений динамическая ММ теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{н.п}(x, t)}{\partial t} &= -v_{н.п}(\bar{G}_{н.п}, \theta_{н.п}) \frac{\partial \theta_{н.п}(x, t)}{\partial x} - R_{н.п}[\theta_{н.п}(x, t) - \theta_{ст}(x, t)] \\ \frac{d\theta_{ст}}{dt} &= R_{с2}(\theta_{н.п} - \theta_{ст}) - nR_{с1}(\theta_{ст} - \theta_{ср}), \end{aligned} \quad \#(1)$$

где  $\theta_{н.п}$ ,  $\theta_{ст}$ ,  $\theta_{ср}$  — температуры насыщенного пара, стенки теплообменных секций АВО и окружающей среды;  $v_{н.п}$  — скорость насыщенного пара, м/с;  $\bar{G}_{н.п}$  — расход насыщенного пара, кмоль/с;  $R_{н.п}$ ,  $R_{с1}$ ,  $R_{с2}$  — физикотехнологические коэффициенты, зависящие от физических свойств насыщенного пара и материала стенки теплообменных секций АВО;  $n$  — количество трубопроводов в АВО.

Второе уравнение в системе (1) является обыкновенным ДУ первого порядка. Для его однозначного решения необходимо знать начальное условие  $\theta_{ст}$  в момент времени  $t = 0$ .

Значение  $\theta_{ст}$  можно получить из экспериментальной зависимости:

$$\theta_{ст} = (\theta_{ср0} - \theta_{yc}) \exp(\beta G_z) + \theta_{yc},$$

где

$$\beta = \frac{\ln[(\theta_{\text{ср}0} - \theta_{\text{yc}})/(q\theta_{\text{yc}} - \theta_{\text{yc}})]}{G_{\text{в max}}}$$

Здесь  $\theta_{\text{ср}0}$  — начальная средняя температура окружающей среды при неработающем вентиляторе;  $\theta_{\text{yc}}$  — установившееся значение температуры окружающей среды;  $G_{\text{в max}}$  — максимальный расход воздуха, нагнетаемый вентилятором;  $q$  — коэффициент, выбираемый из интервала [1,001...1,02]. Этот коэффициент должен отвечать неравенству  $q < \theta_{\text{ср}0} \theta_{\text{yc}}$ .

Граничные условия для температурного профиля пара математической модели (1) определяются выражениями:

$$\theta_{\text{н.п}}(x)|_{x=0} = \theta_{\text{н.п}}^{\text{вх}}(t); \quad \theta_{\text{н.п}}(x)|_{x=l_{\text{аво}}} = \theta_{\text{ст}}^{\text{вх}}(x)$$

Для компьютерного моделирования теплообменных процессов в АВО необходимо преобразовать непрерывную ММ (1) к дискретно-непрерывному виду:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{\text{н.п}i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{\text{н.п}}}{h} + R_{\text{н.п}}\right)\theta_{\text{н.п}i} + \frac{v_{\text{н.п}}}{h}\theta_{\text{н.п}i-1} + R_{\text{н.п}}\theta_{\text{ст}i} \\ \frac{d\theta_{\text{ст}i}}{dt} &= R_{\text{с}2}\theta_{\text{н.п}i} - (nR_{\text{с}1} + R_{\text{с}2})\theta_{\text{ст}i} + nR_{\text{с}1}\theta_{\text{ср}}, \end{aligned} \quad \#(2)$$

где  $v_{\text{н.п}} = v_{\text{н.п}}(\bar{G}_{\text{н.п}}, \theta_{\text{н.п}i})$ .

«Распределенность» вдоль пространственной оси  $x$  можно сосредоточить в трех точках (сечениях) АВО. Такое количество точек обусловлено тем, что пространство АВО можно условно разбить на 3 сечения: точка ввода продукта; средняя точка АВО; точка вывода продукта из АВО. Тогда дискретно-непрерывная модель (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} d\theta_{\text{н.п}1}/dt &= -((v_{\text{н.п}}/h) + R_{\text{н.п}})\theta_{\text{н.п}1} + (v_{\text{н.п}}/h)\theta_{\text{н.п}0} + R_{\text{н.п}}\theta_{\text{ст}1}; \\ d\theta_{\text{н.п}2}/dt &= -((v_{\text{н.п}}/h) + R_{\text{н.п}})\theta_{\text{н.п}2} + (v_{\text{н.п}}/h)\theta_{\text{н.п}1} + R_{\text{н.п}}\theta_{\text{ст}2}; \\ d\theta_{\text{н.п}3}/dt &= -((v_{\text{н.п}}/h) + R_{\text{н.п}})\theta_{\text{н.п}3} + (v_{\text{н.п}}/h)\theta_{\text{н.п}2} + R_{\text{н.п}}\theta_{\text{ст}3}; \\ d\theta_{\text{ст}1}/dt &= R_{\text{с}2}\theta_{\text{н.п}1} - (nR_{\text{с}1} + R_{\text{с}2})\theta_{\text{ст}1} + nR_{\text{с}1}\theta_{\text{ср}}; \\ d\theta_{\text{ст}2}/dt &= R_{\text{с}2}\theta_{\text{н.п}2} - (nR_{\text{с}1} + R_{\text{с}2})\theta_{\text{ст}2} + nR_{\text{с}1}\theta_{\text{ср}}; \\ d\theta_{\text{ст}3}/dt &= R_{\text{с}2}\theta_{\text{н.п}3} - (nR_{\text{с}1} + R_{\text{с}2})\theta_{\text{ст}3} + nR_{\text{с}1}\theta_{\text{ср}}; \end{aligned} \quad \#(3)$$

В соответствии с этой структурной схемой, составленной по системе уравнений (3), была реализована компьютерная модель в программной среде Simulink (Рис. 1). Далее были построены компьютерные модели, соответствующие системе уравнений (2) при  $i=5,9,17,33,65$ . Кроме скорости насыщенного пара, параметры системы в процессе моделирования были неизменны. Был проведен сравнительный анализ графиков изменения контролируемых параметров в каждой из систем. На рисунке 2 представлен график аппроксимированных значений параметров для систем с  $1/i$  периодами дискретизации по пространственной переменной.

На графике (Рис. 2) видно, что наиболее точно процесс теплопередачи в стационарном режиме описывает система из 130 уравнений. Ее мы и будем использовать при построении СУ.

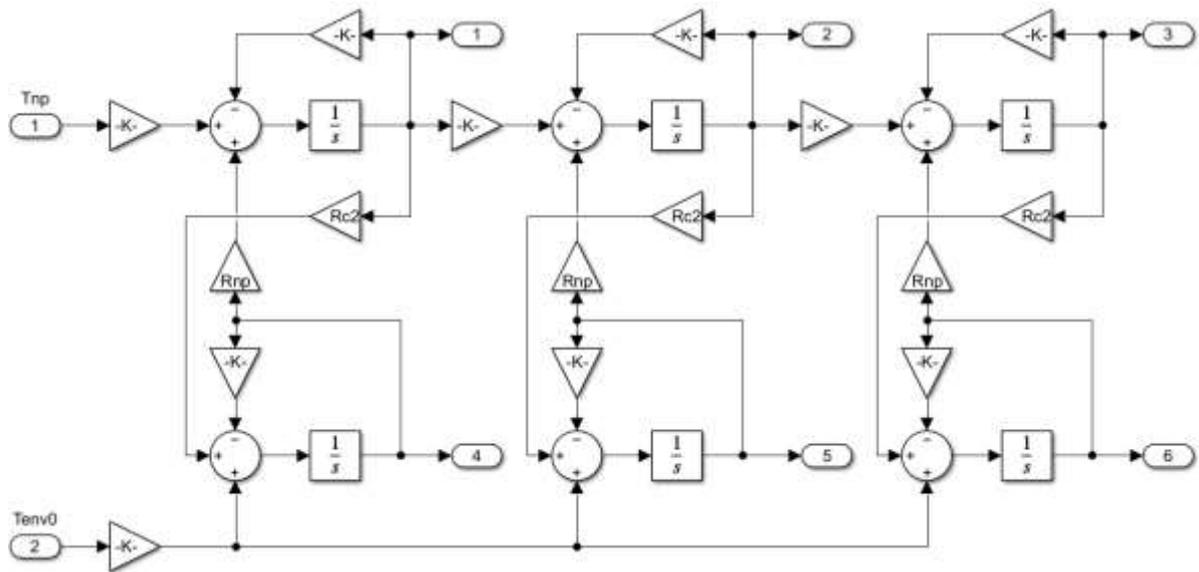


Рис. 1. КМ в среде Simulink.

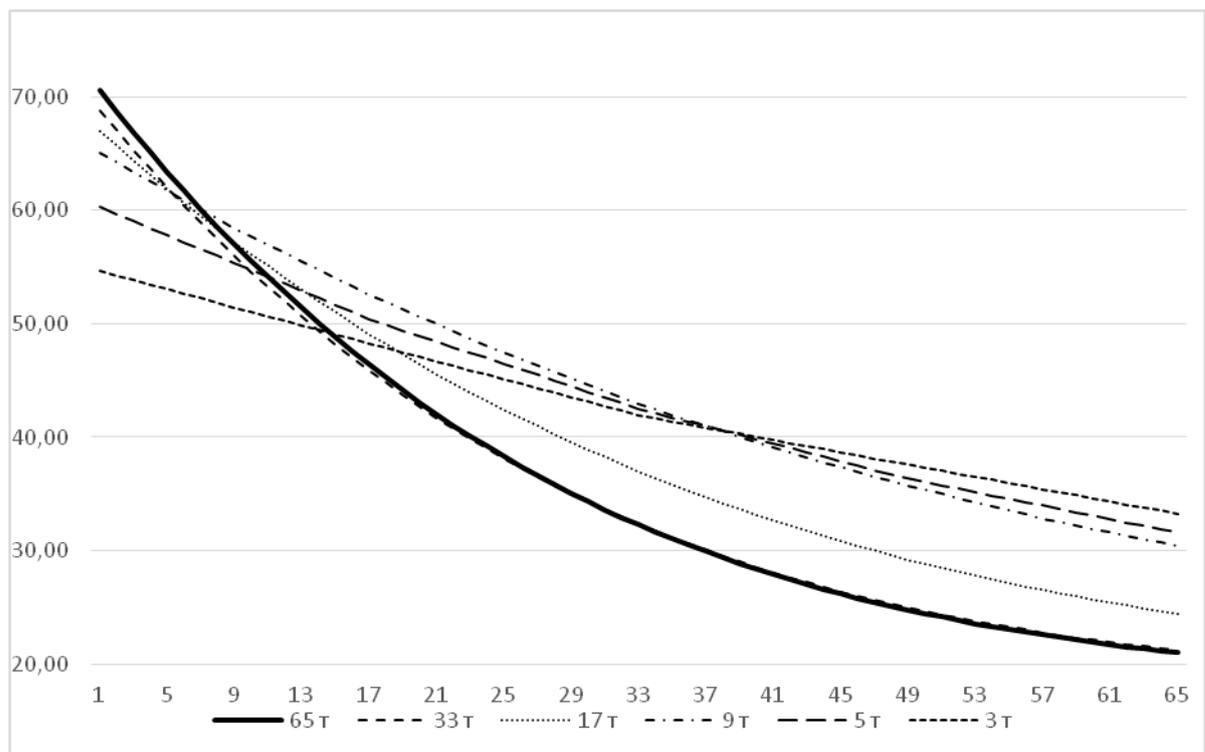


Рис. 2. Распределение температуры насыщенного пара при различных частотах дискретизации.

Основная задача системы регулирования АВО состоит в поддержании заданной температуры жидкой фазы на выходе аппарата. В качестве возмущающих воздействий рассматриваются: изменение режима работы вентилятора, увеличение термического сопротивления, снижение аэродинамических показателей, колебания расхода охлаждаемой или конденсируемой фазы, колебания температуры охлаждаемого или конденсируемого продукта на входе в теплообменные секции АВО. Технически наиболее простым способом регулирования является изменение расхода охлаждающего воздуха посредством применением частотно-регулируемого электропривода вентилятора.

Для реализации основной задачи регулирования, базируясь на (2), была разработана ММ управляемого теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{н.п}}{\partial t} &= v_{н.п}(\overline{G}_{н.п}, \theta_{н.п}) \frac{\partial \theta_{н.п}}{\partial x} - R_{н.п}[\theta_{н.п} - \theta_{ст}] \\ \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial t} &= R_{c1}f(u) + R_{c2}\theta_{н.п} - R_c\theta_{ст} \end{aligned} \quad \#(4)$$

где  $f(u) = \theta_{ср}(Q_в)$  — функция управления температурой среды;  $\theta_{ср}$  — температура окружающей среды (воздуха);  $Q_в$  — расход воздуха, м<sup>3</sup>/с. Соответствующая ММ (4) структурная схема приведена на рисунке 3:

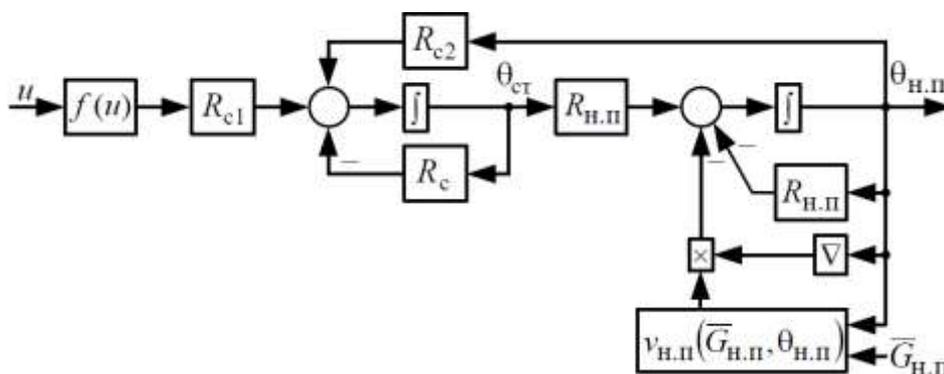


Рис. 3. Структурная схема управляемого теплообменного процесса в АВО.

В процессе компьютерного моделирования была получена серия графиков переходных процессов при различных возмущающих воздействиях. Все переходные процессы удовлетворяют заданным к СУ АВО требованиям. Система регулирования обеспечивает температуру флегмы на выходе АВО на требуемом уровне ( $\theta_{н.п.к} = 33,82 \text{ C}^\circ$ ).

**Вывод:** В результате работы была рассмотрена ММ СУ АВО. Были приняты необходимые допущения, и с их учетом была построена ММ процесса теплообмена, представленная в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями. Для построения КМ был выполнен переход от непрерывных к дискретно-непрерывным уравнениям. Был проведен анализ дискретно-непрерывных систем на основе данных, полученных в результате компьютерного моделирования установившихся процессов. В результате была выбрана система, наиболее близко описывающая исследуемые тепловые процессы. На основе построенной ММ была синтезирована СУ, с регулятором в виде частотно-регулируемого электропривода вентилятора. Полученная СУ была проверена при различных возмущающих воздействиях. СУ удовлетворяет требуемым характеристикам — поддерживает заданную температуру насыщенного пара.

### Список литературы

1. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. — 496 с.
2. Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н. Моделирование систем управления: учеб. пособие для вузов. М.: Студент, 2012. — 347 с.
3. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 160 с.
4. Абрамкин С. Е., Грудяева Е. К., Душин С. Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 6. — С. 35–40.

## ПЕРСПЕКТИВЫ НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Б.М. МАДЖИДОВ, Г.В. ФАЙЗИЕВ

*Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В мире, где информационные технологии важны и одновременно несовершенны, организации и отдельные лица постоянно сталкиваются с проблемой определения того, как использовать сложные, хрупкие системы в динамичных условиях для достижения надежных результатов. В то время как надежность является главной заботой специалистов по информационным системам на многих уровнях, в исследованиях информационных систем мало внимания уделялось тому, как предприятия и отдельные лица создают, управляют и используют технологии для достижения надежности. Авторы предполагают, что изучение того, как отдельные лица и организации используют информационные системы для надежного выполнения работы, повысит как эффективность, так и актуальность исследований информационных систем. Опираясь на исследования индивидуального и организационного познания, рассматривается концепция внимательности как теоретической основы для объяснения усилий по достижению индивидуальной и организационной надежности перед лицом сложных технологий и неожиданных сред. Также рассматриваются различные последствия осознанных теорий надежности в форме альтернативных интерпретаций существующих знаний и новых направлений исследований в области эксплуатации, проектирования и управления информационными системами.

**Ключевые слова:** *Внимательность, надежность, операции информационных систем, управление информационными системами, проектирование информационных систем, отказоустойчивость.*

Парадокс зависимости от сложных систем, состоящих из ненадежных компонентов для надежных результатов редко признается в теоретических дискуссиях об эксплуатации, проектировании и управлении информационными системами. Исследования в области информационных систем, как правило, предполагают наилучший сценарий в отношении надежности информационных систем, фокусируясь на методах достижения надежной работы путем создания технически надежных информационных систем из структурированных комбинаций компонентов. Несмотря на то, что повышение технической надежности является центральной задачей, данный акцент не учитывает тот факт, что многие важные системы не являются и, возможно, не могут быть надежными по своей природе. Практически нерешенными остаются вопросы о том, как отдельные лица и организации достигают надежной производительности при работе с ненадежными системами. Это может быть одной из причин, почему литература по информационным системам часто имеет неземной оттенок, кажущийся одновременно правильным и в то же время неактуальным для практиков, которые должны заставить все работать с реальными технологиями, пользователями и организациями.

Вместо того, чтобы предполагать, что индивидуальная и организационная надежность выходит за рамки исследований информационных систем, их роль в реализации надежной работы должна быть в центре внимания. Авторы попытались затронуть то, как организации достигают надежности при работе с фундаментально сложными, хрупкими и часто ненадежными информационными системами. Центральное место в данном подходе занимает тот факт, что индивидуальная и организационная надежность зависит как от того, какая работа выполняется, так и от того, как она выполняется. Заранее спланированные подпрограммы, на которых сосредоточено большинство усилий по проектированию информационных систем, являются необходимыми,

но недостаточными элементами надежной работы. Также необходимо, чтобы системы и процессы способствовали индивидуальной и коллективной внимательности — способу работы, характеризующемуся концентрацией на настоящем, вниманием к операционным деталям, готовностью рассматривать альтернативные точки зрения и интересом к исследованию и пониманию неудач.

В настоящее время, когда практически каждая организация работает с использованием той или иной информационной системы, ее надежность представляется одним из ключевых факторов, влияющих на конкурентное преимущество организации от ее использования. Более того, при столкновении с новыми глобальными интернет-угрозами (такими как программы-вымогатели и массовые хакерские атаки) поддержание надежности, безопасности и точности информационных систем в организации становится одной из самых больших проблем управления информационными системами.

Понятие надежности во многом связано с управлением информационными системами и их повседневным использованием в организации. В основном это связано с тем, что в современной организации, когда критическая система каким-либо образом недоступна, это оказывает значительное и немедленное влияние на бизнес. Это не только влияет на бизнес-операции, но и как таковое оказывает чрезмерное влияние на восприятие бизнесом информационных систем в организации и подрывает ее потенциал для поддержки бизнес-процессов. Это также влияет на способность быть конкурентоспособными на рынке и потенциально может повлиять на удовлетворенность клиентов.

Следовательно, данный факт делает надежность критической проблемой для современных менеджеров и современного предприятия. Кроме того, этот вопрос особенно важен для секторов, которые почти полностью зависят от информационных систем, чтобы обеспечить возможность эффективного производства.

Большинство предприятий используют шесть различных типов информационных систем, каждая из которых имеет функциональные возможности, помогающие управлять определенным бизнес-подразделением или организационным уровнем.

### **Системы обработки транзакций**

Транзакция включает в себя все покупки и продажи продуктов и услуг, а также любые повседневные деловые операции или действия, необходимые для работы компании.

Количество и типы выполняемых транзакций варьируются в зависимости от отрасли и размера/масштаба компании. Примеры типичных транзакций включают в себя выставление счетов клиентам, банковские депозиты, новые данные о найме, подсчет запасов или запись данных управления взаимоотношениями между клиентами.

### **Системы офисной автоматизации**

Система автоматизации делопроизводства представляет собой сеть различных инструментов, технологий и людей, необходимых для выполнения канцелярских и управленческих задач.

Типичные примеры функций, выполняемых системой автоматизации офиса, включают печать документов, отправку документов по почте, рассылку по почте, ведение календаря компании и создание отчетов. Прежде всего, система автоматизации офиса помогает улучшить связь между различными отделами, чтобы каждый мог сотрудничать для выполнения задачи.

### **Системы управления знаниями**

Система управления знаниями хранит и извлекает информацию, чтобы помочь пользователям расширить свои знания и оптимизировать совместные усилия для выполнения задач. Примеры документов, найденных в системе управления знаниями, включают учебные материалы для сотрудников, политики и процедуры компании или ответы на вопросы клиентов.

Система управления знаниями используется сотрудниками, клиентами, руководством и другими заинтересованными сторонами, связанными с организацией. Она гарантирует то, что технические возможности интегрированы во всей компании, а визуальные эффекты помогают сотрудникам понять данные, которые они видят.

### **Информационные системы управления**

Информационная система управления использует различные данные о транзакциях, чтобы помочь руководству среднего звена оптимизировать планирование и принятие решений.

Система извлекает информацию, объединяет ее и создает отчеты, чтобы помочь руководителям узнать важные детали ситуации. Резюме и сравнения используются, чтобы позволить старшим менеджерам оптимизировать процесс принятия решений для достижения лучших результатов.

### **Системы поддержки принятия решений**

Система поддержки принятия решений обрабатывает данные, чтобы помочь в принятии управленческих решений. Она хранит и собирает информацию, необходимую руководству для принятия надлежащих мер в нужное время. Например, менеджер банка может использовать систему поддержки принятия решения для оценки меняющихся кредитных тенденций, чтобы определить, какие годовые цели по кредитам должны быть достигнуты.

Модели принятия решений запрограммированы в ИС для анализа и обобщения больших объемов информации и представления ее в наглядном виде, что делает ее понятной.

### **Системы информационного обеспечения**

Системы информационного обеспечения аналогичны системам поддержки принятия решений, но в основном используются руководителями и владельцами для оптимизации процесса принятия решений.

Экспертная система помогает руководителям предприятий находить ответы на нестандартные вопросы, чтобы они могли принимать решения, улучшающие перспективы и производительность компании. В отличие от системы поддержки принятия решений, система информационного обеспечения обеспечивает лучшую телекоммуникационную функциональность и большую вычислительную функциональность.

В заключение представлены ключевые выводы, которые следует помнить о каждом типе информационной системы:

Системы обработки транзакций обрабатывает все данные о транзакциях клиентов и сотрудников, поэтому организация может оптимизировать рабочие процессы и легко получать необходимую информацию.

Система автоматизации офиса управляет всеми канцелярскими и управленческими ежедневными задачами в бизнесе, помогая оптимизировать общение и улучшить совместную работу.

Система управления знаниями обрабатывает опыт по различным предметам и помогает в обмене знаниями, чтобы пользователи могли получать больше информации и повышать эффективность своей работы.

Информационная система управления использует данные системы обработки, чтобы помочь менеджерам среднего звена оптимизировать процесс принятия решений и контролировать производительность.

Система поддержки принятия решений обрабатывает информацию, чтобы помочь менеджерам сделать правильный выбор в нужное время.

Система информационного обеспечения управляет всей необходимой информацией, нужной руководителям предприятия для наблюдения за конкуренцией, отслеживания внутренней эффективности и точного определения возможностей роста.

### Список используемой литературы

1. Голицына, О.Л. Информационные системы: Учебное пособие / О.Л. Голицына, Н.В. Максимов, И.И. Попов. — М.: Форум, 2016. — 352 с.
2. Лашина, М.В. Информационные системы и технологии в экономике и маркетинге: Учебное пособие / М.В. Лашина, Т.Г. Соловьев. — М.: КноРус, 2018. — 480 с.
3. Одинцов, Б.Е. Информационные системы управления эффективностью бизнеса: Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / Б.Е. Одинцов. — Люберцы: Юрайт, 2016. — 206 с.
4. Рыжко, А.Л. Информационные системы управления производственной компанией: Учебник для академического бакалавриата / А.Л. Рыжко, А.И. Рыбников, Н.А. Рыжко. — Люберцы: Юрайт, 2016. — 354 с.
5. Федорова, Г.Н. Информационные системы / Г.Н. Федорова. — М.: Academia, 2018. — 544 с.

## НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА (FUZZY LOGIC) В СИСТЕМАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

М.Л. НЕМЦОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе рассматриваются теоретические основы и практическое применение нечеткой (fuzzy) логики. Дано описание двух наиболее популярных программных пакетов. Решены две практические задачи — управление теплообменником и распознавание контура фигур.

*Ключевые слова:* нечеткая логика, нечеткая модель, fuzzy logic, matlab fuzzy logic toolbox, fuzzyTech.

### Введение

Создание компьютерных систем поддержки принятия решений сопряжена с большими затратами на разработку математических моделей, на их тестирование и настройку, на программирование законченного программного продукта. Без использования современных технологий в этом процессе достижение успеха становится или слишком дорогостоящим, или даже невозможным.

**Целью работы** является исследование применения теории нечетких множеств в системах поддержки принятия решения.

**Актуальность исследования** подтверждается широким применением рассматриваемых методов и подходов, а также высокой популярностью рассматриваемых программных пакетов разработки нечетких моделей.

Нечеткая логика (fuzzy logic) позволяет в достаточно строгой математической форме организовать кодирование как лингвистической (качественной) информации, так и количественных данных. Причем «связывание» этих данных происходит понятными средствами традиционной алгебры или математической логики. Однако введение такого нового атрибута для каждого фактора, как *субъективная мера принадлежности* совершенно видоизменяет.

Переход от «черно-белой» (0 или 1) оценки фактов и ситуаций к их оцениванию мерой принадлежности в интервале [0;1] позволяет приблизить модельное (машинное) решение к процедуре логического вывода в мозге человека.

Духовным отцом теории нечетких множеств, или как ее упрощенно называют *нечеткой логики*, признан профессор университета Беркли (Калифорния, США) Лотфи Заде. Основы теории были опубликованы в начале 60-х годов прошлого века.

Революционное значение теории состоит в смене «акцентов» при построении моделей окружающего мира: вместо попытки все более точного описания объектов традиционными математическими моделями предложен новый аппарат, наиболее адекватно отражающий многообразие мира и особенности его восприятия человеческим сознанием.

Активное практическое применение теории началось в 70-е годы благодаря достаточному развитию мощностей вычислительной техники. Первое промышленное применение относится к 1973 г. и послужило базой для развития самостоятельной ветви нечеткой логики — нечеткого автоматического регулирования (*Fuzzy Control*).

### **Программные средства**

Разработка эффективных систем поддержки принятия решения не представляется без применения специальных инструментальных сред, предоставляющих пользователю набор необходимых «комплектующих», технологию «конструирования» и алгоритмы настройки прототипа готовой системы.

К наиболее развитым системам для создания и отладки нечетких продукционных моделей можно отнести *fuzzyTECH* и *MatLab Fuzzy Logic Toolbox*.

*Fuzzy Logic Toolbox* — это пакет расширения MATLAB, содержащий инструменты для проектирования систем нечеткой логики. Пакет позволяет создавать экспертные системы на основе нечеткой логики, проводить кластеризацию нечеткими алгоритмами, а также проектировать нечеткие нейросети. Все функции пакета написаны на открытом языке MATLAB, что позволяет контролировать исполнение алгоритмов, изменять исходный код, а также создавать свои собственные функции и процедуры.

Программный пакет *fuzzyTECH* разработан и постоянно модифицируется немецкой компанией Infoi'm GmbH (Inform Software Corporation). Он предназначен для решения различных задач нечеткого моделирования.

По сравнению с пакетом Fuzzy Logic Toolbox, пакет *fuzzyTECH* является *специализированным* средством, которое позволяет разрабатывать разнообразные нечеткие системы в графическом режиме, а также транслировать их в программу на одном из языков программирования, в том числе и для реализации ее в программируемых микроконтроллерах.

### Моделирование управления теплообменником

Задача состоит в нагреве и поддержании заданной температуры, например, в бассейне, путем управления температурой нагревательного элемента.

Так как процесс нагрева/остывания воды довольно инерционен, необходимо оперировать не абсолютными значениями температур, а их относительными разностями: разность температур на выходе и входе теплообменника ( $T_{io}$ ) и отклонение температуры воды на выходе от заданной ( $T_{dif}$ ). Результатом работы модели является регулировка температуры нагревательного элемента ( $P$ ).

Процесс моделирования и тестирования в пакете fuzzyTECH показан на рис. 1, а в пакете Fuzzy Logic Toolbox из программы Matlab на рис. 2.

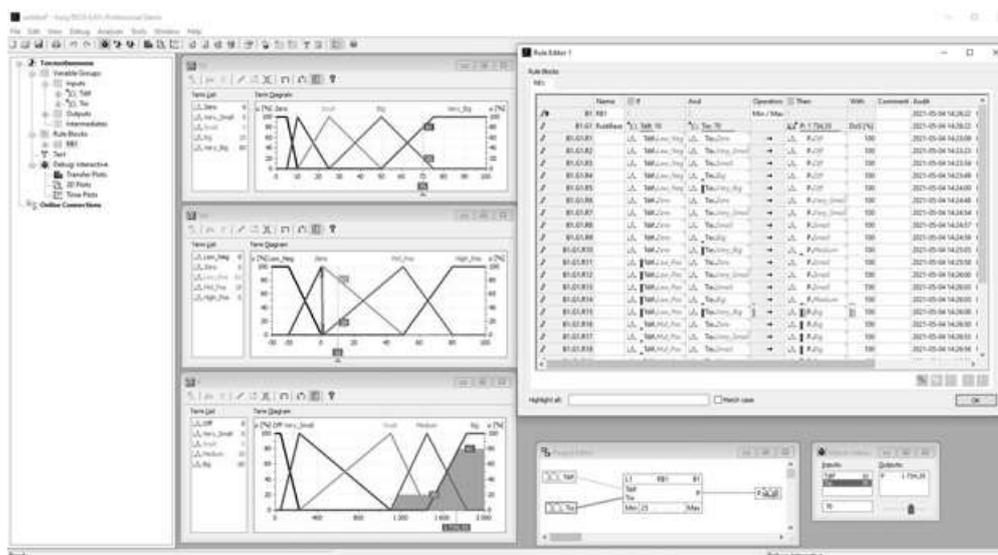


Рис. 1. Модель теплообменника в пакете fuzzyTECH.

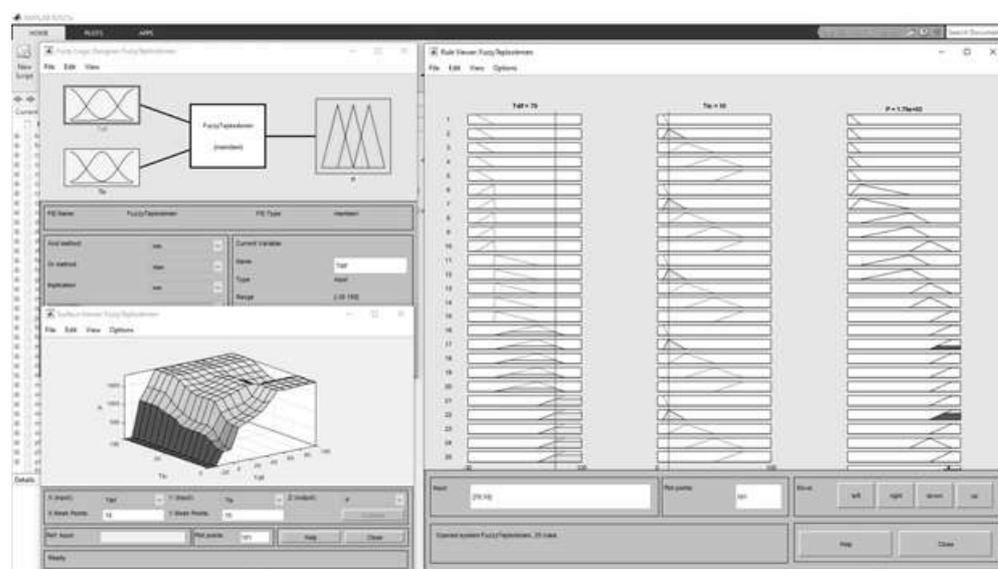


Рис. 2. Модель теплообменника в пакете Fuzzy Logic Toolbox.

Процесс моделирования показал, что при одинаковых значениях входа обе модели предлагает практически идентичный результат.

По результатам моделирования в двух средах можно отметить, что обе системы обладают широким функционалом построения и тестирования нечетких моделей. В них присутствуют мощные редакторы лингвистических переменных и баз правил. Полученную модель можно сразу протестировать, есть возможность просмотра проекции входных данных на все правила модели, можно построить график поверхности. Также в обеих системах предусмотрена возможность генерации кода на языках программирования, для включения модели в программные реализации.

Но, с точки зрения «юзабилити», мне кажется, удобнее fuzzyTECH, как специализированный инструмент работы с нечеткими моделями.

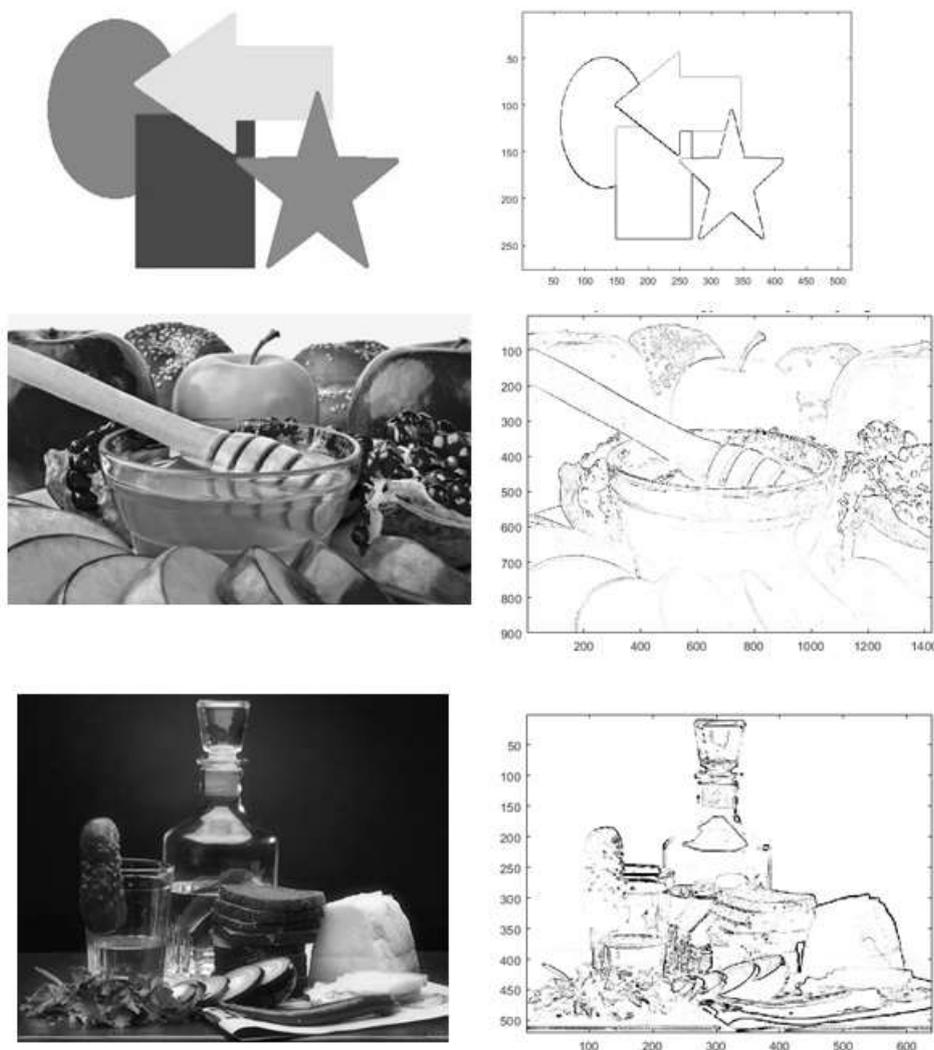


Рис. 3. Работа нечеткой модели определения контура.

### Нечеткая модель обработки изображений

В данной задаче рассмотрим использование нечеткой логики в моделях, связанных с обработкой изображений, а именно, определение контура фигур на изображениях.

Контур является границей между двумя областями. Его можно обнаружить путем сравнения интенсивности соседних пикселей, однако, отличие интенсивности не всегда является контуром, а может быть, например, затенением, что необходимо учитывать при построении функции принадлежности (контур или универсальной области) нечеткого множества.

Алгоритм работы модели включает в себя следующие шаги:

1. Импорт исходного изображения RGB и преобразование его в шкалу полутонов. Происходит уменьшение размерности задачи.

2. Получение градиентов изображения для наложения фильтров.

3. Прогон всех пикселей через нечеткую модель для определения принадлежности контуру фигуры..

4. Построение и вывод результата. На основе анализа из предыдущего пункта осуществляется построение нового изображения, содержащего пиксели только черного цвета, т.е. контур фигур.

На рис. 3 приведены примеры работы модели, где слева — исходное изображение (изначально цветное), а справа — полученный контур.

Таким образом построена модель, способная определить контуры фигур на изображении, что может быть применимо, например, в системе распознавания образов.

В отличие от предыдущей задачи, здесь явным лидером оказался пакет Matlab. Благодаря своей универсальности и широкому функционалу удалось совместить как разработку нечеткой модели, так и операции, связанные с обработкой и вводом / выводом изображений.

### Список литературы

1. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений/А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. — М.: Радио и связь, 1989. — 304с.
2. К.Асаи, Д.Ватада, С.Иваи. Прикладные нечеткие системы: пер. с япон./ под ред. Т.Тэрако, К.Асаи, М.Сутэко. — М.:Мир, 1993. — 368 с.
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ Петербург, 2005. — 736 с.

## ВИРТУАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ТЕОРЕМЫ ГЮЙГЕНСА — ШТЕЙНЕРА МЕТОДОМ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В.А. БАСЫРОВ, Д.Р. ПАВЛОВ, Р.А. ПОРШНЕВ, И.Л. ШЕЙНМАН

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Разработан сайт для виртуального выполнения виртуальной лабораторной работы по физике «Проверка теоремы Гюйгенса — Штейнера методом вращательных колебаний». Получены аналитические зависимости для описания происходящих при выполнении лабораторной работы процессов. На основе измеренных на реальной установке данных определены параметры этих зависимостей. Построенная строгая виртуальная модель эксперимента практически неотличима от реальной, что позволяет студентам 1 курса провести

физический эксперимент в виртуальном формате без потери качества по сравнению с очным форматом обучения.

*Ключевые слова:* физика, виртуальная лабораторная работа, Теорема Штейнера, вращательные колебания

### **Введение**

В настоящую эпоху распространения коронавирусной инфекции чрезвычайно актуальным оказалось дистанционное обучение на основе стремительного развития цифровых образовательных технологий<sup>1</sup>, позволяющее студентам проходить обучение в отсутствие очного контакта между собой и с преподавателями [1,2]. Особую важность в обучении курсу общей физики имеет экспериментальный лабораторный практикум, позволяющий своими руками проверить и подтвердить на опыте изучаемые в курсе физики теоретические закономерности. Настоящая работа посвящена разработке программы-сайта, которая максимально точно моделирует лабораторную работу по механике: «Проверка теоремы Гюйгенса — Штейнера» на установке, которая присутствует в лаборатории физики СПбГЭТУ [3].

### **Лабораторная работа по проверке теоремы Гюйгенса — Штейнера методом вращательных колебаний.**

В моделируемой лабораторной работе определяется момента инерции эталонного диска методом вращательных колебаний и экспериментальная проверка теоремы Гюйгенса — Штейнера. Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой колебательную систему, вращающуюся в горизонтальной плоскости, которая включает закрепленный на вертикальной оси диск (шкив), его ремень связан с упругими пружинами, зацепленными за штыри стойки. К шкиву жестко прикреплен металлический профиль с рядом отверстий, в которых фиксируются грузы.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке программы Приоритет-2030 проект СПбГЭТУ «Открытая адаптивная школа талантов и фундаментального превосходства в области точных наук на базе синтеза возможностей человеческого и искусственного интеллектов».



Рис. 1. Вид экспериментальной установки.

Для того чтобы виртуальная установка была максимально приближена к условиям реального эксперимента, были проведены измерения на реальной экспериментальной установке.

В положении равновесия силы упругости пружин, а, следовательно, и силы натяжения нити с разных сторон диска (шкива) одинаковы. Обозначим эти силы  $F_0$ . Для выведения шкива из положения равновесия повернем его на угол  $\varphi$ . По закону Гука силы упругости изменятся на  $k\varphi R$  (здесь  $k$  — коэффициент жесткости каждой пружины,  $R$  — радиус шкива). Тогда на шкив будет действовать возвращающий момент сил

$$M = R(F_0 - k\varphi R) - R(F_0 + k\varphi R) = -2k\varphi R^2, \quad (1)$$

Подставив уравнение (1) в основное уравнение динамики вращательного движения

$$M = I\beta = I\varphi''$$

получим дифференциальное уравнение для  $\varphi$ :

$$I\varphi'' + 2kR^2\varphi = 0, \quad \varphi'' + \omega^2\varphi = 0$$

которое является каноническим дифференциальным уравнением гармонического осциллятора. Его решение имеет вид

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega t + \alpha).$$

Здесь  $\varphi_0$  и  $\alpha$  — константы, определяемые начальными условиями, а

$$\omega = \sqrt{\frac{2kR^2}{I}}$$

— собственная частота колебаний рассматриваемого маятника.

При реализации программы значение константы  $\alpha$  принималось равным 0.

Если радиус цилиндров  $r$ , их масса  $m$ , то при установке цилиндров на расстоянии  $l$  от оси вращения колебательной системы ее момент инерции

$$I = I_{\text{д}} + 2\left(\frac{1}{2}mr^2 + ml^2\right) + 2\frac{1}{2}m_n R^2, \quad (2)$$

где  $I_{\text{д}}$  — момент инерции диска с металлическим профилем,  $\frac{1}{2}mr^2 + ml^2$  — момент инерции одного цилиндра, рассчитанный согласно теореме Гюйгенса–Штейнера,  $m_n$  — масса пружины, каждая из которых входит в выражение (2) с коэффициентом  $1/2$ , поскольку один конец пружины остается неподвижным.

Опытным путём было установлено, что угол отклонения диска относительно оси вращения зависит от времени по следующей зависимости

$$\varphi(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(g\omega t),$$

где  $\tau$  — коэффициент затухания,  $g$  — некоторый коэффициент, который был рассчитан для каждого положения грузиков, в том числе и при установке одного грузика или при их полном отсутствии.

Также для каждого положения грузиков на реальной экспериментальной установке был рассчитан коэффициент затухания. Было установлено, что данный коэффициент линейно зависит от квадрата расстояний грузиков от оси вращения (рис. 2).

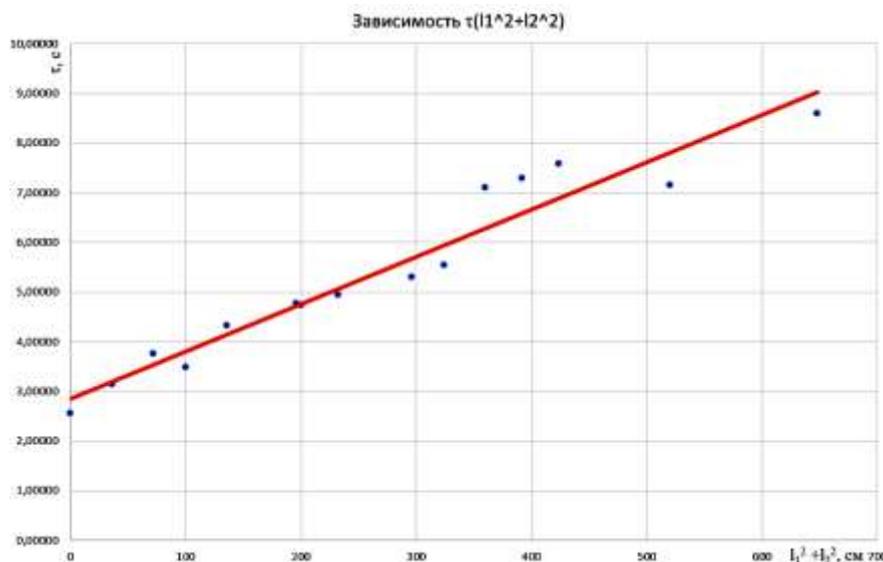


Рис. 2. Зависимость  $\tau(l_1^2 + l_2^2)$ .

Ключевые параметры полученной расчетной модели — расстояния от центра установки и наличие грузиков на диске — отвечают за ее совпадение с реальным экспериментом. Для того чтобы привязать грузики к определенному положению на диске,

был реализован специальный алгоритм, определяющий положение грузиков на странице и в зависимости от этого считывающий расстояние от центра диска.

Программа автоматически рассчитывала то положение диска, в котором он должен быть в зависимости от времени и положения грузиков.

Предполагается несколько запусков программы. Для этого пользователю предоставлены специальные кнопки, которые моделируют работу секундомера, а также возможность самостоятельно заново отклонять диск посредством ползунка.

На основе построенной расчетной модели была реализована виртуальная лабораторная работа в виде сайта, отображающая работу установки. Для гарантии стабильной работы сайта при различных условиях запуска (различные браузеры, операционные системы, стационарные и мобильные устройства, а также сервера, поддерживающие передачу скриптов на эти устройства) в его реализации использованы только стандартные языки программирования, без использования готовых или автоматизированных решений.

Верстка веб-приложения выполнена на HTML, позиционирование объектов и дизайнерские решения описаны на CSS, а логика, включая взаимодействие с виртуальной средой в соответствии с расчетной схемой, реализована на JavaScript.

### **Выводы и дальнейшие перспективы исследования**

Разработанная виртуальная установка по проверке теоремы Гюйгенса-Штейнера методом вращательных колебаний позволит решить проблему дистанционного выполнения работы для всех первокурсников СПбГЭТУ. В тоже время процесс измерения в виртуальной работе проще контролируется пользователем, следовательно, студенты смогут провести более точные замеры. В дальнейшем итоги работы этого проекта помогут в будущем виртуализировать как можно больше лабораторных установок.

### **Список литературы**

1. Шейнман И. Л. Виртуальный лабораторный практикум по физике // Материалы XXVI международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. — С. 274-276.
2. Шейнман И. Л. Развитие и апробация виртуального лабораторного практикума по физике // Материалы XXVII Международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 21 апреля, 2021.
3. Шейнман И. Л. Механика и термодинамика: учеб.-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. — 114 с.

## **ВИРТУАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ**

Д.Р. ПАВЛОВ, Р.А. ПОРШНЕВ, И.Л. ШЕЙНМАН

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Разработан сайт для виртуального выполнения виртуальной лабораторной работы по физике «Исследование термодинамических циклов». Получены аналитические зависимости для описания происходящих при выполнении лабораторной работы процессов. На основе измеренных на реальной установке данных определены параметры этих зависимостей.

Построенная строгая виртуальная модель эксперимента практически неотличима от реальной, что позволяет студентам 1 курса провести физический эксперимент в виртуальном формате без потери качества по сравнению с очным форматом обучения.

**Ключевые слова:** физика, виртуальная лабораторная работа, термодинамический цикл, определение показателя адиабаты

## Введение

Внедрение в реальный учебный процесс СПбГЭТУ «ЛЭТИ» принципиально новой открытой цифровой платформы непрерывного, многоуровневого и индивидуализированного обучения студентов является основой проекта «Открытая адаптивная школа талантов и фундаментального превосходства в области точных наук на базе синтеза возможностей человеческого и искусственного интеллектов».<sup>2</sup>

Цифровые технологии открывают новые перспективы для проведения обучения курсу общей физики. Разработка цифрового виртуального лабораторного практикума по физике является одним из ключевых моментов в обеспечении дистанционного обучения физике. Целью настоящей работы является создание сайта для выполнения виртуальной лабораторной работы по исследованию термодинамического цикла, используемой при обучении студентов 1 курса на кафедре физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

## Лабораторная работа по исследованию термодинамических циклов

В моделируемой лабораторной работе исследуется политропно-изохорно-политропно-изобарический ( $nVnP$ ) цикл. Экспериментальная установка (рис. 1) содержит баллон, который может сообщаться либо с насосом, либо с атмосферой. Атмосферное давление и температура могут быть измерены с помощью лабораторных барометра и термометра. Внутри баллона помещён манометр М, измеряющий избыточное давление. Одно деление шкалы равно 4 мм вод. ст., что составляет 40 Па. Рабочим газом является воздух. Микрокомпрессор позволяет осуществить нагнетание воздуха в баллон.

Для того, чтобы виртуальная установка была максимально приближена к условиям реального эксперимента, были проведены измерения на реальной экспериментальной установке.

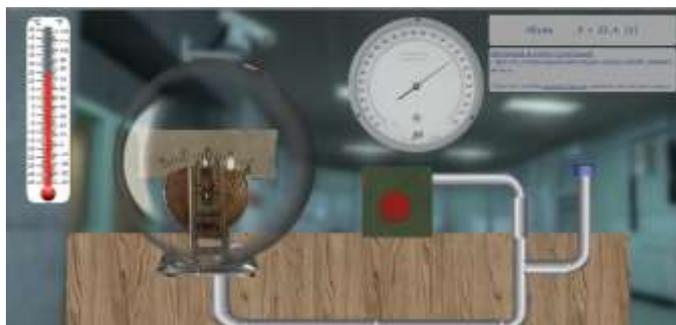


Рис. 1. Вид экспериментальной установки.

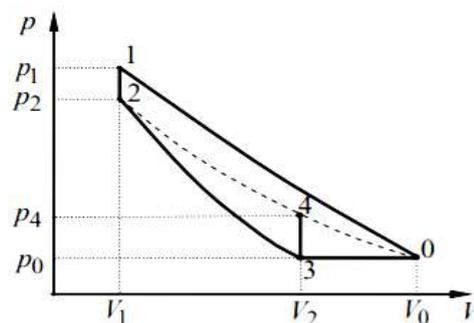


Рис.2. Диаграмма исследуемого цикла.

Суть работы заключается в том,

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке программы Приоритет-2030 проект СПбГЭТУ «Открытая адаптивная школа талантов и фундаментального превосходства в области точных наук на базе синтеза возможностей человеческого и искусственного интеллектов».

что пользователь фиксирует избыточные давления в различных состояниях термодинамического цикла.

Процесс 0-1 (Рис. 2) является политропным. В ходе данного процесса происходит закачка воздуха в баллон, кран сообщается с трубкой. Уравнение Пуассона связывает начальные и конечные параметры системы

$$P_0 V_0^n = P_1 V_1^n \quad \text{или} \quad P_0^{1-n} T_0 = P_1^{1-n} T_1. \quad (1)$$

На основе анализа заснятого видеоряда процесса накачки было установлено, что стрелка манометра двигается с практически постоянной скоростью 10 Па/с. Показание  $\Delta P_1 = P_1 - P_0$  снимает пользователь в тот момент, когда он выключает компрессор. Опытным путём было установлено, что входящий в (1) показатель политропы  $n = 1.17$ .

Процесс 1-2 является изохорным, для него справедлив закон Шарля:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}. \quad (2)$$

Учитывая, что  $T_2 = T_0$  и подставив (1) в (2), избыточное давление в состоянии 2 оказывается равным:

$$\Delta P_2 = P_1^n P_0^{1-n} - P_0.$$

В ходе данного процесса закачка воздухом не производится, устанавливается тепловое равновесие.

В результате измерений на реальной экспериментальной установке было выяснено, что избыточное давление с течением времени в данном процессе изменяется по экспоненциальной зависимости и стремится к значению  $\Delta P_2$ :

$$\Delta P(t) = \Delta P_2 + (\Delta P_1 - \Delta P_2) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

На рис. 3 приведён график зависимости  $\Delta P(t)$  при  $\Delta P_1(t) = 80$  Па.

В ходе процесса 2-3 кран сообщается с атмосферой, компрессор выключен. Процесс 2-3 является политропным, его начальное и конечное состояния описывает уравнение

$$P_2 V_2^n = P_3 V_3^n \quad \text{или} \quad P_2^{1-n} T_2 = P_3^{1-n} T_3. \quad (4)$$

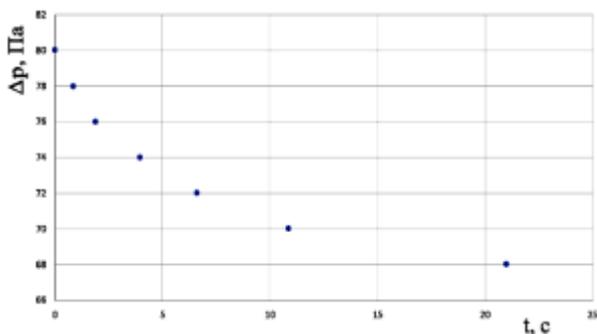


Рис. 3. Процесс изохорического остывания 1-2

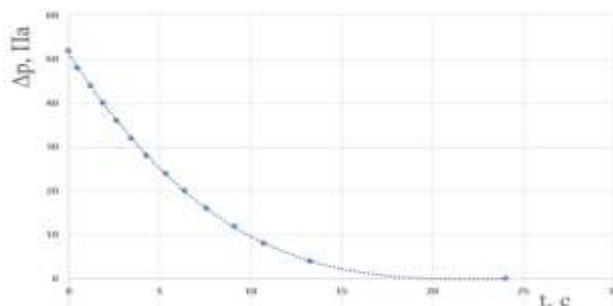


Рис. 4. Процесс политропического выпуска 2-3

На основе анализа заснятого видеоряда процесса выпуска было установлено, что стрелка манометра движается согласно зависимости:

$$\Delta P(t) = \frac{\Delta P_2}{52} (-0.0038t^3 + 0.276t^2 - 6.6t + 52)$$

На рис. 4 приведён график зависимости  $\Delta P(t)$  для  $\Delta P_2(t) = 60$  Па.

Показание  $\Delta P_3$  снимает пользователь в тот момент, когда он переводит кран в положение сообщения с трубкой. Экспериментальный показатель политропы в данном процессе  $n = 1.59$ .

Процесс 3-4 является изохорным, начальные и конечные состояния описывает уравнение

$$\frac{P_3}{T_3} = \frac{P_4}{T_4}. \quad (5)$$

Учитывая, что  $T_4 = T_0$  и подставив (4) в (5), избыточное давление в состоянии 4 оказывается равным:

$$\Delta P_4 = P_3^{\frac{1}{n}} P_2^{n-1} - P_0, \quad n = 1.59.$$

В ходе данного процесса закачка воздухом не производится, устанавливается тепловое равновесие.

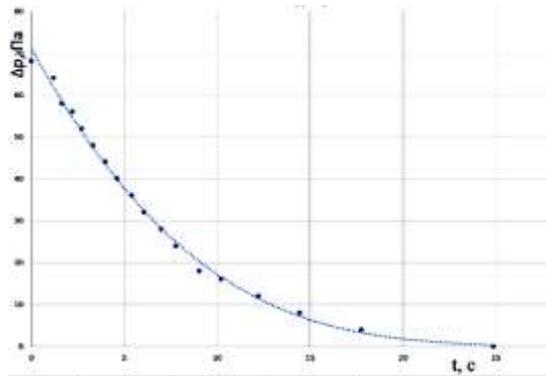


Рис. 5. Процесс политропического выпуска при включенном компрессоре

В результате теоретического анализа, подтвержденного измерением на реальной экспериментальной установке, было выяснено, что избыточное давление с течением времени в данном процессе изменяется по экспоненциальной зависимости, как и в процессе 1-2, и стремится к значению  $\Delta P_4$ .

$$\Delta P(t) = \Delta P_4 + (\Delta P_3 - \Delta P_4) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Так же рассмотрен случай, при котором кран открыт на атмосферу и включен компрессор. При данных условиях избыточное давление будет меняться по следующей зависимости

$$\Delta P(t) = \frac{\Delta P_{start}}{72} (-0.0044t^3 + 0.324t^2 - 8.2t + 72)$$

где  $\Delta P_{start}$  — последнее значение избыточного давления до перехода в состояние, при котором кран соединён с атмосферой и включен компрессор. На рис. 5 приведён график зависимости  $\Delta P(t)$ .

Для того, чтобы совершить очередной запуск цикла, нужно выключить компрессор, соединить кран с атмосферой и дождаться, пока избыточное давление не станет равным нулю, а также подождать ещё несколько секунд, пока не установится тепловое равновесие.

Ключевой параметр полученной расчетной модели — избыточное давление. Для его нахождения был реализован функционал связи отображаемой на мониторе стрелки и шкалы манометра с текущим расчетным избыточным давлением. Избыточное давление меняется в зависимости от того, с чем соединён кран и в каком состоянии компрессор в данный момент времени.

Программа автоматически рассчитывает, каким должно стать избыточное давление исходя из текущих условий, а также сама определяет, по какой зависимости она будет двигаться к этому давлению.

Также программа каждый день генерирует случайное атмосферное давление в пределах от 740 мм рт. ст. до 760 мм рт. ст. и температуру в пределах от 17°C до 25°C и отображает их на барометре и термометре соответственно.

На основе построенной расчетной модели была реализована виртуальная лабораторная работа в виде сайта, отображающая газовый процесс в реальном времени. Для гарантии стабильной работы сайта при различных условиях запуска (различные браузеры, операционные системы, стационарные и мобильные устройства, а также сервера, поддерживающие передачу скриптов на эти устройства) в его реализации использованы только стандартные языки программирования, без использования готовых или автоматизированных решений.

Верстка сайта выполнена на HTML, позиционирование объектов и дизайнерские решения описаны на CSS, а логика, включая взаимодействие с виртуальной средой и обработку значений давлений в соответствии с расчетной схемой, реализована на JavaScript.

### **Выводы и дальнейшие перспективы исследования**

Построенная модель расчёта избыточных давлений для моделирования лабораторной работы по исследованию термодинамических циклов позволила реализовать ее в виде виртуальной лабораторной установки — сайта. Данная работа выполнена с высокой точностью, результаты совпадают с работой реальной установки. В перспективе студенты смогут дистанционно выполнять измерения лабораторных работ по исследованию политропно-изохорно-политропно-изобарических процессов.

### **Список литературы**

1. Шейнман И.Л.. Виртуальный лабораторный практикум по физике // Материалы XXVI международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. — С. 274-276.
2. Шейнман И.Л.. Развитие и апробация виртуального лабораторного практикума по физике // Материалы XXVII Международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.
3. Шейнман И.Л. Механика и термодинамика: учеб.-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. — 89 с.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ЗЛОКАЧЕСТВЕННОЙ ОПУХОЛИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

П.Л. ФЕДОТОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Аналитический обзор математической модели роста опухоли. Моделирование процесса роста опухоли. Построение фазового портрета. Аналитическое выявление особенностей фазового пространства с целью замедления или прекращения процесса роста раковых клеток.

### **Введение**

Злокачественные новообразования являются малоизученными заболеваниями всех млекопитающих, в том числе и человека. А так же служат одной из основных причин ранней смертности среди населения. Новообразования появляются вследствие мутации генов. Когда один или несколько генов мутируют и становятся патологическими, то клетка и её потомки размножаются намного быстрее, чем нормальные клетки. Новообразование или опухоль представляет собой увеличение количества патологических клеток. Пока это количество сгруппировано и ограничено полостью, опухоль считается доброкачественной. Опухоль становится злокачественной, если выходит из полости и распространяется на внеклеточном матриксе или строме. Раковые клетки могут создавать вторичные опухоли при проникновении в кровоток.

На данный момент существует огромное количество экспериментальных данных о процессе роста опухоли, но отсутствует единое объяснение клинических исследований ввиду «неточности» медицины. Математические модели призваны «уточнить» такую науку, как медицина, и создаются для развития единой теоретической модели, способной объяснить все происходящее на практике. В работах [1-4] представлены данные модели.

В рассматриваемой математической модели опухоль состоит из трех типов клеток:

- делящиеся;
- нормальные;
- погибшие.

Используемые допущения:

- апоптоз у делящихся клеток отсутствует;
- нормальные клетки в отсутствие делящихся размножаются по логистическому закону;
- погибшие клетки неподвижны;
- ткань образовавшейся структуры считается малосжимаемой;
- точечные размеры опухоли;
- пренебрежение процессом диффузии.

Сумма концентраций нормальных и погибших клеток должна быть равна единице.

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= \mu_1 x_1 (1 - x_3) - \gamma_1 x_1 x_3; \\ \frac{dx_2}{dt} &= \mu_2 x_2 (1 - x_2 - x_3) - (\gamma_2 x_1 x_2 + \gamma_3 x_2 x_3); \\ \frac{dx_3}{dt} &= (\gamma_2 x_1 x_2 + \gamma_1 x_1 x_3 + \gamma_3 x_2 x_3)(1 - x_3), \text{ где}\end{aligned}$$

- $x_1$  — концентрация делящихся клеток;
- $x_2$  — концентрация нормальных клеток;
- $x_3$  — концентрация погибших клеток;

**Параметры:**

$\mu_1, \mu_2$  — скорости собственного размножения делящихся и нормальных клеток соответственно (время удвоения);

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ - коэффициенты, характеризующие взаимодействие с иммунной системой;

**Построение процессов  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ .**

При построении графика требуется ненулевое начальное условие для  $x_1$ .

Для  $x_2$  начальное условие принимается равное 1, поскольку изначально все клетки считаются здоровыми. Примем параметры:

$$\mu_1 = \mu_2 = 1,7; \gamma_1 = \gamma_3 = 0,2; \gamma_2 = 0,1$$

С помощью программного средства Matlab были построены графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  при начальных условиях (0.001;1;0).

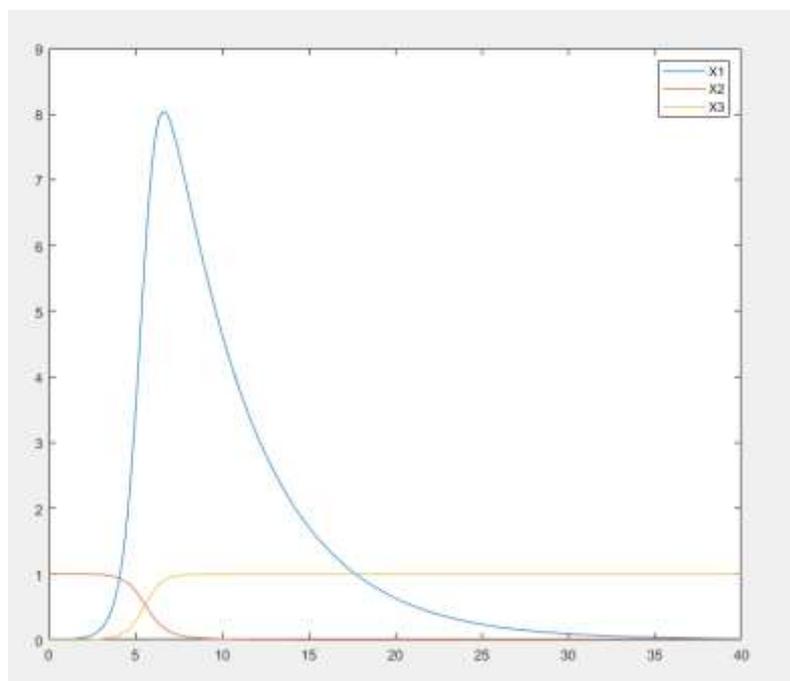


Рис. 1. Графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ .

На данном рисунке отображен стремительный начальный рост концентрации делящихся клеток. Затем после смерти нормальных клеток начинается отрицательный рост делящихся клеток вплоть до нуля.

Согласно графику можно выделить следующее:

- нормальные клетки являются «пищей» для делящихся клеток;
- мертвые клетки при превышении некоторой концентрации являются сдерживающим фактором роста делящихся клеток;

Предположительно, рост делящихся клеток можно замедлить или остановить, если увеличить концентрацию мертвых клеток или уменьшить концентрацию нормальных клеток.

**Исследование стационарных точек:**  $(0; 0; 1)$  — устойчивая (узел) и  $(0; 1; 0)$  — седло  
 Аналитически возможно найти такие частные параметры  $\mu_1, \mu_2, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , при которых:

$$\frac{-d \pm \sqrt{d^2 + 4\mu_2 b \frac{\mu_2 - a}{\gamma_2}}}{-2\mu_2} + \frac{\mu_1}{\mu_1 + \gamma_1} = 1;$$

$$0 < \quad ;$$

,

$$\text{где } d = \left( \mu_2 - a + c - \frac{b\mu_2}{\gamma_2} \right), \quad a = \frac{(\mu_2 + \gamma_2)}{\mu_1 + \gamma_1}.$$

Тогда, возможно, одна или две точки будут иметь физический смысл, что позволит определить их устойчивость и дополнительную возможность изменения топологии фазового пространства с целью замедления или остановки процесса роста раковых клеток.

Составим фазовое пространство данной модели.

С помощью программного средства Jupiter Notebook было построено фазовое пространство в диапазонах:

$$0 < x_1 < 2; 0 < x_2 < 1; 0 < x_3 < 1$$

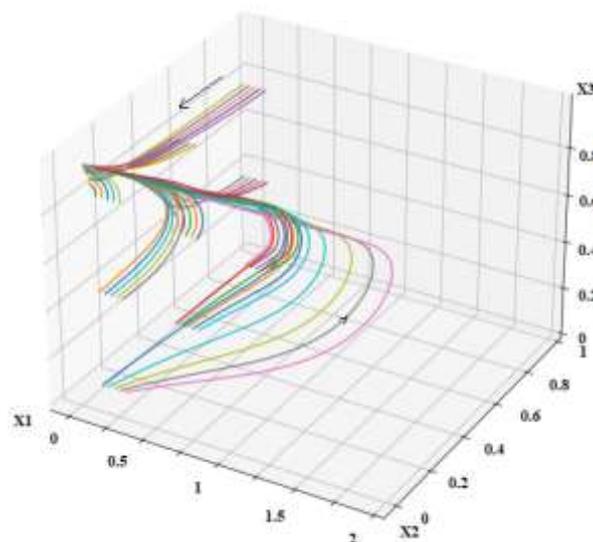


Рис. 3. Фазовое пространство.

Фазовые траектории сходятся к стационарной точке  $(0; 0; 1)$ , что подтверждает ее устойчивость.

Аналитически выявлено, что точка  $(0; 1; 0)$  является седлом, что также отображено на фазовом пространстве.

### **Вывод**

В результате работы была рассмотрена математическая модель процесса роста раковых клеток. Аналитически найдены стационарные точки, исследованы на устойчивость. Построен график состояния системы от времени. Построено фазовое пространство. Теоретически, для системы в общем виде возможно управление концентрацией делящихся клеток за счет уменьшения локальной концентрации здоровых клеток и увеличения локальной концентрации мертвых клеток. Возможны частные случаи системы для определенных параметров  $\mu_1, \mu_2, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ , при которых появляются одна или две стационарные точки. В таком случае расширяется возможность управлением концентрацией делящихся клеток.

### **Список литературы**

1. Жукова И.В., Колпак Е.П., Математические модели злокачественной опухоли // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 10. Прикл. матем. Информ. Проц. упр., 2014, № 3, — 5 -18
2. Колобов А.В., Анашкина А.А., Математическая модель роста опухоли с учетом дихотомии миграции и\пролиферации // Компьютерные исследования и моделирование. 2009. Т. 1, № 4. — С. 415–422.
3. Астанин С. А., Лобанов А. И., Трёхмерная модель роста невааскуляризированной опухоли в ткани»// Математика. Компьютер. Образование. 2005. Ч. 1. — С. 759–769.
4. Колобов А.В., Полежаев А.А. Влияние случайной подвижности злокачественных клеток на устойчивость фронта опухоли // Компьютерные исследования и моделирование. 2009. Т. 1, № 2. — С. 225-232.

## СЕКЦИЯ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

### МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИЕМА ЭКСТРЕННЫХ ПАЦИЕНТОВ В СТАЦИОНАРНОМ ОТДЕЛЕНИИ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

О.В. ГРИГОРЬЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В статье описывается возможность использования теории массового обслуживания при организации приема экстренных пациентов в стационарном отделении скорой медицинской помощи. Для описания модели используются аналитические формулы расчёта вероятности отказа и среднего времени ожидания. Теория массового обслуживания может позволить предварительно проанализировать работу модели до ее реализации.

*Ключевые слова:* теория массового обслуживания, отделение скорой помощи, вероятность поступления, проектирование

#### **Введение**

Своевременное оказание первой медицинской помощи очень важно. В современных реалиях качество оказываемой медицинской помощи зависит не только от квалификации персонала клиники, наличия современного медицинского диагностического оборудования, лекарственных препаратов, но и от комплексного подхода к организации работы медицинского подразделения. В целях улучшения качества предоставляемых услуг, оптимизации работы персонала применяются различные методы, которые позволяют повысить эффективность работы медицинского учреждения. Одной из таких технологий является метод медицинской сортировки *triag* основанный на показателях степени тяжести состояния пациента в момент поступления в приемное отделение, а не на предварительном диагнозе. Данный метод успешно применяется в нескольких ведущих медицинских учреждениях, таких как московская городская клиническая больница № 40 в Коммунарке, больница Первого медицинского университета в Санкт-Петербурге и другие.

#### **Описание модели**

При сортировке рассматриваются три основные категории пациентов: «зеленый» пациент (категория 3), «желтый» пациент (категория 2), «красный» пациент (категория 1). Также возможно появление других категорий больных, таких как бальные с подозрением на инфекционные заболевания, пациенты в состоянии наркотического или алкогольного опьянения и другие.

Модель должна учитывать следующие параметры:

— число пациентов каждой категории, которые могут находиться на обслуживании (число приборов обслуживания);

— максимальное количество пациентов каждого типа, которые могут находиться в ожидании начала обслуживания (количество мест в очереди).

— организация очереди (общая, отдельная, отсутствие очереди).

Под регламентом обслуживания будем понимать:

— среднее время обслуживания пациентов каждой категории;

— возможность поступления пациентов: на санитарном транспорте (скорая помощь), самостоятельно;

— транспортировка внутри отделения в сопровождении медицинского персонала;

— выписка или перевод пациентов в иное отделение больницы.

Каждая категория имеет свои требования[1]:

— для пациентов 1 категории отдельная зона с собственным медицинским оборудованием. Время ожидания в очереди пациентов данной категории должно сводиться к минимуму;

— для пациентов 2 и 3 категорий общий зал ожидания, собственные зоны. Время ожидания пациентов 20 и 40 минут соответственно.

Исходя из вышеперечисленных условий получаем следующую модель, представляющую несколько систем массового обслуживания.



Рис. 1. Модель потока больных.

Модель построена таким образом, что процессы с пациентами первой категории происходят параллельно с процессами других категорий и не зависят от них. Для пациентов второй и третьей категорий существует зависимость между собой, из-за наличия общей зоны ожидания, имеющей конечное количество мест.

### Использованные данные

Введем обозначения:

$\lambda_i$  — интенсивность поступления пациентов  $i$ -ой категории ( $i=1,2,3$ ).

$\mu_i$  — интенсивность диагностирования пациентов  $i$ -ой категории ( $i=1,2,3$ ).

Так как каждая категория обслуживается отдельно, а общим является только накопитель, то в качестве первоначальной модели можно использовать системы массового обслуживания (СМО) с числом обслуживающих приборов  $k_i$ .

Вероятность того, что в  $i$ -ой системе находится  $j$  заявок, можно вычислить по формуле[1]:

$$P_{ij} = \rho_i^j / j! * P_{i0}, \quad j \leq k_i;$$

$$P_{ij} = \rho_i^j / (k_i! k_i^{j-k_i}) P_{i0}, \quad j > k_i$$

где  $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$ ,  $\lambda_i / \mu_i < k_i$ , а  $P_{i0}$  вычисляется по формуле

$$P_{i0} = \left( 1 + \rho_i + \frac{\rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_i^{k_i-1}}{(k_i-1)!} + \frac{\rho_i^{k_i}}{(k_i-1)!(k_i-\rho_i)} \right)^{-1}$$

Средняя очередь  $\bar{x}_{iочер} = \frac{\rho_i^{k_i+1}}{(k_i-1)!(k_i-\rho_i)^2} \cdot P_{i0}$

Среднее время ожидания  $t_{iож} = \frac{\bar{x}_{iочер}}{\mu k_i}$

### Вариации исходных данных

Среднее число «зеленых» больных за сутки — 313 человек[2]. Отсюда получаем, что  $\lambda_{3\Sigma}$  — 13 больных /час. Среднее время диагностирования, отпущенное на одного «зеленого» составляет интервал от 5 до 15 минут, тогда  $4 < \mu_{3i} < 12$

Пусть  $\mu_{3\Sigma} = 8$ , тогда будем полагать, что имеет место следующее равенство

$$\rho_3 = \frac{\lambda_{3\Sigma}}{\mu_{3\Sigma}} = 1,625$$

Таблица 1

Время ожидания $t_{3ож}$ , мин	
$k_3$	$t_{3ож}$
1	-
2	204,58
3	20,1
4	3,9
5	0,79

Из таблицы 1 видно, что для «зеленой» категории необходимо минимум 3 прибора (время ожидания должно быть меньше 40 минут). Возможно использование большего количества приборов, но оно не является необходимым и нецелесообразно с финансовой точки зрения.

### **Заключение**

Отделение скорой медицинской помощи при больнице является одним из самых наукоемких отделений с огромными внешними и внутренними параметрами. С учетом изменения процесса распределения пациентов по технологии triag, необходимы новые модели и подходы к управлению процессов внутри отделения. Рассмотрены и структурированы три основных процесса приема экстренных пациентов. Предложена математическая модель процессов, происходящих в отделении СМП. Полученные результаты являются частью основы для создания информационно-программного комплекса, позволяющего значительно повысить качество оказания медицинских услуг.

### **Список литературы**

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие / — 5-е изд., стер.— Москва : КНОРУС, 2016.— 448 с
2. Багненко, С. Ф. Организация работы стационарного отделения скорой медицинской помощи : метод. рек. / Багненко С. Ф. и др. — Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2015. — 80 с.
3. Ambulance services in Wales, 2018-19. [Electronic resource]. URL: <https://gov.wales/sites/default/files/statistics-and-research/2019-06/ambulance-services-april-2018-to-march-2019-761.pdf>

## **ПРОБЛЕМЫ НЕЗРЯЧИХ И СЛАБОВИДЯЩИХ ЛЮДЕЙ ПРИ РАБОТЕ С ИНТЕРФЕЙСАМИ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

Е.Е. ДОПИРА, Н.А. НАЗАРЕНКО

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** При взаимодействии пользователей с информационными технологиями уделяется особое значение правильному восприятию информации. Этот процесс происходит с помощью трех каналов восприятия — механическому, визуальному и слуховому. У людей с инвалидностью по зрению может отсутствовать один из каналов восприятия, что усложняет использование ими смартфонов. В данной работе были выявлены трудности пользователей с нарушениями зрения при взаимодействии с интерфейсами мобильных приложений. Введение общих стандартов для информационных систем может исключить возникающие трудности, облегчить работу пользователей и в дальнейшем повысить их работоспособность.

*Ключевые слова:* незрячий пользователь, слабовидящий пользователь, нарушение зрения, доступность, пользовательский интерфейс.

### **Введение**

13 декабря 2006 года вступила в силу Конвенция о правах инвалидов, принятая Генеральной Ассамблеей ООН. Этот документ показал необходимость доступа «инвалидов к новым информационно-коммуникационным технологиям и системам, включая Интернет», и положил начало унификации [1]. Создание и внедрение общих стандартов доступности обусловлено статистическими данными, так как около 10% населения Земли входят в инвалидную группу, из них около 3,5% инвалиды по зрению.

Причинами как полной потери зрения, так и появления нарушений различной степени могут выступать травмы, сильная зрительная нагрузка без соблюдения какого-либо режима, включая длительную и непрерывную работу за компьютером и др. Частота встречаемости таких случаев и проявление нарушений обуславливают увеличившийся интерес к данной проблеме. При этом в 2022 году большинство людей пользуются

смартфонами, однако его интерфейс может быть не адаптированными для людей с инвалидностью по зрению [2]. Если устройства сложны в использовании, то это снизит их производительность труда и принесет финансовый ущерб работодателям.

**Целью работы** является выявление трудностей пользователей с нарушениями зрения при взаимодействии с информационными технологиями.

### **Категории пользователей**

Незрячие пользователи — люди, которые не способны с помощью зрения воспринимать графическую и печатную информацию [3].

Категория незрячих пользователей при взаимодействии с информационными технологиями использует слух и осязание. Для того, чтобы понимать элементы интерфейса и их расположение используются программы экранного доступа или дисплей Брайля. Эти элементы мы рассмотрим чуть позже.

В категорию слабовидящих пользователей входят люди с небольшими нарушениями или с остаточным зрением, острота его зависит от вида заболевания. Но эта категория имеет дополнительно возможность использовать как минимум периодически остатки своего зрения при работе, например, с интернет-ресурсом.

**Доступность** — это принципиальная возможность пользоваться продуктом (услугой, средой, устройством) той или иной группе людей [4].

При анализе доступности интернет-ресурса или мобильного приложения под пользователями с инвалидностью по зрению чаще всего подразумевают слабовидящих людей, не учитывая группу незрячих пользователей. Любой интернет-ресурс, доступный только для слабовидящих пользователей, не всегда может быть доступен для незрячих. Но в другую сторону это имеет обратный эффект — ресурсы, доступные для незрячих пользователей по большей части доступны для всех остальных категорий пользователей с ограничениями. В данной работе в качестве пользователей с нарушением зрения мы рассматриваем и слабовидящих, и незрячих.

### **Специальные устройства вывода**

Незрячие люди часто используют специальные устройства ввода/вывода, ориентированные на людей с проблемами зрения. Например, брайлевский дисплей — это устройство вывода, предназначенное для отображения текстовой информации в виде шеститочечных символов азбуки Брайля. К особенностям брайлевского дисплея относят сложность и специфичность работы со шрифтом Брайля, который больше подходит для людей полностью потерявших слух и зрение, а также высокая цена, сравнимая со средней стоимостью компьютера. Поэтому это устройство люди с нарушениями зрения используют реже чем, программы экранного доступа или встроенные программы чтения экрана.

Большинство пользователей не сталкиваются со системными службами специальных возможностей, способными полностью озвучить все элементы интерфейса и позволяющие пользоваться устройством без помощи зрения. Самыми распространенными являются Talkback для смартфонов с операционной системой Android и VoiceOver — для IOS. Каждая служба имеет достоинства и недостатки, но механизм работы аналогичен — приложение озвучивает и помогает распознать элементы интерфейса такие, как пункты меню, кнопки, ссылки, поля ввода.

Для использования этих технологий необходимо предварительное обучение. Службы используют специальный набор жестов для управления, отличный от привычного для пользователя. Для перемещения по экрану необходимо проводить двумя пальцами вверх или вниз в зависимости от направления, а для перехода от одной страницы на другую — влево или вправо. Для выбора используют нажатие на элемент интерфейса, после чего содержимое элемента озвучивается. Для взаимодействия с элементами интерфейса пользователь должен произвести два последовательных нажатия в произвольную часть экрана после проведения операции выбора.

Может сложиться впечатление, что при таком подходе отпадает необходимость в дисплее смартфона. Но это утверждение ошибочно, так как категория слабовидящих пользователей все еще использует зрение при работе. Не стоит забывать, что не все даже часто используемые интернет-ресурсы поддерживают системные службы специальных возможностей. В этом случае у пользователей появляются трудности в работе и необходимость в помощи зрячих людей. Данный фактор влияет и на удобство использования продукта.

Как правило, владельцы информационных продуктов следуют двум подходам в направлении к доступности. Первый — это реализовать версию для обычных пользователей и дополнительно вторую для пользователей с ограничениями по зрению. Это финансово обременительно, поэтому преимущественно выбирают основную версию продукта делать адаптивной. Во втором подходе помимо возможных ошибок, чаще реализуется версия для слабовидящих, не соответствующая действующим ГОСТ Р 52872-2007 и ГОСТ Р 52872-2019 и международному стандарту WCAG 3.0 [5,6,7].

### **Трудности**

Рассмотрим трудности, с которыми сталкиваются пользователи с нарушениями зрения:

Голосовой набор текста не является самым предпочтительным вариантом у пользователей. Программа распознавания не всегда способна точно понять речь, в связи с этим возникают ошибки. Также появляются ограничения, так как не все программы распознают знаки препинания на слух и имеют удобную функцию редактирования набранного текста. В этом случае приходят к использованию дисплея Брайля или стандартной клавиатуры в сочетании с системными службами.

Отсутствие структуры: заголовков и абзацев — при чтении текста осложняет восприятие вложенной информации. Но даже появление структуры в виде наличия заголовков максимальной длины не представляется лучшей альтернативой. Если читателю непонятно, присутствует ли в тексте необходимая информация, любой пользователь предпочтет закрыть его. Поэтому предпочтительным будет использование древовидной структуры.

Частое обновление страницы ограничивает время для ознакомления с ней. В этом случае придется пересматривать содержимое несколько раз. Например, это часто встречается на сайтах покупки авиабилетов. После нескольких таких попыток пользователь закроет страницу. Решением может выступать уменьшение количества динамически обновляемых элементов.

При первом изучении, как уже было отмечено, за максимально короткий срок пользователь должен найти необходимую ему информацию. Неудобно, если на сайте будет много информации, не представляющей интереса. В этом плане хорошей

альтернативой являются мобильные версии, где обычно меньше элементов интерфейса, или разделение информации на несколько страниц.

Атрибуты элементов озвучиваются встроенными программами чтения информации на экране. При наличии нескольких кнопок, отвечающих за разные операции, может не учитываться факт, заданные атрибуты будут озвучиваться системными службами. Поэтому названия кнопок могут быть неразличимы, например, `button1`, `button2` и т.д. Это весьма озадачит пользователя, особенно при работе с важными данными и повлечет ошибки. Поэтому следует в атрибутах указывать текстовые значения, лаконично описывающие выполняемую элементом интерфейса функцию.

У категории слабовидящих людей появляются сложность, а иногда невозможность восприятия разного рода шрифтов, изображений и текста с минимальной контрастностью, наличие большого числа деталей и анимаций на экране. В качестве решения можно использовать коэффициент контрастности и шрифты, предназначенные для людей с нарушениями зрения, а изображения должны иметь альтернативный текст для озвучивания системными службами.

Создание обязательных требований к интерфейсу, решающего описанные выше трудностей поможет незрячим и слабовидящим людям при взаимодействии с информационными технологиями. В разработанных на их основе интерфейсах должны отсутствовать неожиданности, а на изучение тратится немного усилий.

### **Заключение**

При взаимодействии любого пользователя с информационными технологиями уделяется особое значение механическому, зрительному и слуховому восприятию информации. Но в случае возникновения нарушений, один из каналов восприятия может отсутствовать, поэтому смартфоны необходимо адаптировать для людей с инвалидностью по зрению. Если устройства сложны в использовании, то это снизит производительность труда незрячих и слабовидящих людей, а также принесет финансовый ущерб их работодателям. В данной работе были выявлены трудности пользователей с нарушениями зрения при взаимодействии со смартфонами. А именно: не точное распознавание речи существующими программы голосового набора; отсутствие структуры в тексте, большое количество информации и частое обновление мешает ознакомлению пользователя со страницей; исходный код, а также элементы интерфейса не адаптированы и не могут правильно восприниматься людьми с нарушениями зрения. Введение общих стандартов для информационных систем облегчит работу пользователей и может повысить их работоспособность.

### **Список литературы**

1. Конвенция ООН о правах инвалидов: принята Резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН от 13 декабря 2006 г. № 61/106//Собрание законодательства РФ. 2013. 11 февраля. № 6. — 2013.
2. Смартфоны (рынок России). TAdviser. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>.
3. Любимов А. А. и др. Исследование обеспечения доступности интернет-ресурсов Рунета для людей с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) //НП Культурный центр «Без Границ». — 2013.
4. AccessIT. DO-IT Programs. URL: <https://www.washington.edu/doiit/programs/accessit?ID=1109>.
5. ГОСТ Р. 52872-2007. Интернет-ресурсы. Требования доступности для инвалидов по зрению. — 2009.
6. ГОСТ Р 52872-2019 Интернет-ресурсы и другая информация, представленная в электронно-цифровой форме. Приложения для стационарных и мобильных устройств, иные пользовательские интерфейсы. Требования доступности для людей с инвалидностью и других лиц от ограничениями жизнедеятельности. — 2020.

7. W3C Accessibility Guidelines (WCAG) 3.0. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 3.0. URL: <https://www.w3.org/TR/wcag-3.0/>

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НОУТБУКОВ

В.Д. ТУМАНОВА, Л.А. ШУМИЛОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В данной работе описывается модель производительности ноутбуков от их системных параметров, полученная методом множественного регрессионного анализа в программе статистической обработки данных SPSS. Полученная модель содержит параметры ноутбука, которые позволяют наиболее точно предсказать его производительность, не проводя непосредственных замеров. Такими параметрами являются: объем кэшей L2 и L3 процессора, его тактовая частота, а также объем оперативной памяти.

*Ключевые слова:* Регрессионный анализ, линейная регрессия, SPSS, параметры ноутбука

### **Постановка задачи. Формирование цели**

В официальных интернет магазинах можно найти ноутбуки абсолютно разных ценовых категорий: от 3,7 тыс. рублей до 621 тыс. рублей. Характеристики данных устройств будут значительно отличаться. Среди характеристик ноутбука можно найти следующие параметры: тактовая и максимальная тактовая частота процессора, частота шины процессора, год выпуска процессора, объем кэшей L2 и L3 процессора, размер и частота оперативной памяти, ее тип, вид накопителя, а также вид графического ускорителя. Перед покупкой нового устройства остро стоит проблема выбора наиболее значимых характеристик, которые бы в большей мере влияли на производительность: на какие параметры обращать внимание в первую очередь?

Целью работы является построение модели производительности ноутбуков от их системных параметров методом множественного регрессионного анализа с использованием программы для статической обработки данных SPSS. Полученная модель позволит не только выделить наиболее значимые для производительности параметры ноутбуков, но и позволит сравнивать ноутбуки по производительности между собой, не выполняя дополнительных тестов, а исходя только из их характеристик.

### **Множественный регрессионный анализ**

Множественная регрессия является расширением простой линейной регрессии. Она позволяет исследовать влияние двух и более независимых переменных на зависимую переменную.

В данной задаче независимыми переменными являются параметры ноутбуков: тактовая и максимальная тактовая частота процессора, частота шины процессора, год выпуска процессора, объем кэшей L2 и L3 процессора, размер и частота оперативной памяти, ее тип, вид накопителя, а также вид графического ускорителя. Зависимой переменной является показатель производительности ноутбука в бенчмарке Mark 10. Значения бенчмарка измерялись для развлекательного режима использования ноутбука, которому соответствовала работа ноутбука со следующими активными программами:

6 текстовых страниц Google Chrome, фильм 1080p в проигрывателе Windows Media, а также фоновая раздача Wi-Fi сети на портативные устройства.

Среди указанных параметров есть как количественные (объем оперативной памяти, кэшей L2 и L3 процессора, и т.д.), так номинальные данные (тип оперативной памяти, вид накопителя, вид графического ускорителя). Для проведения регрессионного анализа смысловая (текстовая) информация должна быть закодирована числовыми кодами (качественная информация), а затем, в случае если переменная принимает более двух значений, преобразована в соответствующее количество дихотомических переменных.

В качестве алгоритма включения независимых переменных в уравнение линейной регрессии был выбран метод шагового отбора, который является комбинацией пошаговых методов включения и исключения. Данный метод заключается в изменении доли влияния независимой переменной на критерии при добавлении в уравнение других независимых переменных. В случае если влияние какой-либо включенной переменной ослабевает, данная переменная исключается из уравнения.

### Полученная регрессионная модель

В результате множественного регрессионного анализа была получена модель, в которую входят параметры с коэффициентами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты регрессионной модели

Параметр	Нестандартизированные коэффициенты		Стандартизированный коэффициент $\beta$	$t$	Знач.	Доверительный интервал для $\beta$ (95%)	
	$\beta$	Стд. Ошибка				Нижняя граница	Верхняя граница
Константа	72,573	337,815		,215	,832	-628,013	773,158
Объем кэша L3 процессора	225,966	40,573	0,518	5,569	,000	141,822	310,110
Объем оперативной памяти (больше или равен 8 Гб)	503,553	158,631	0,272	3,174	,004	174,572	832,534
Объем кэша L2 процессора	659,692	182,297	0,328	3,619	,002	281,631	1037,753
Тактовая частота процессора	338,078	136,838	0,184	2,471	,022	54,293	621,863

Таким образом, используя нестандартизированные коэффициенты  $\beta$ , можно получить уравнение регрессии (1), выражающее зависимость между производительностью ноутбука и его параметрами.

$$\begin{aligned} \text{Производительность}_{\text{прогноз}} = & 72,573 + 225,966(\text{кэшL3}) + 659,692(\text{кэшL2}) + \\ & + 503,533(\text{Оперативная\_память} \geq 8\text{Гб}) + 338,078(\text{Такт\_частота}) \end{aligned} \quad (1)$$

Благодаря  $\beta$  коэффициентам можно наблюдать положительную связь между каждым из предикторов и зависимой переменной. Это говорит о том, что, например, согласно модели, чем больше тактовая частота процессора, тем более производительным будет ноутбук. Более того, каждый  $\beta$  коэффициент показывает силу связи каждого предиктора с производительностью, при условии, что значение остальных предикторов является константным. Например, если выбирать между двумя абсолютно одинаковыми ноутбуками, за исключением того, что у одного ноутбука объем кэша L2 на 1 МБ больше, чем у второго, то значение производительности первого будет больше второго на 659,692 единиц.

Стандартная ошибка равна стандартному отклонению коэффициентов  $\beta$ , рассчитанных для разных выборок. Она является мерой стабильности коэффициентов. Все коэффициенты в несколько раз превышают свои стандартные ошибки. Как видно из таблицы 1, наиболее точным коэффициентом является объем кэша L3 процессора.

Отношение коэффициента  $\beta$  к своей стандартной ошибке показывает  $t$  статистика. Она показывает, вносит ли данный предиктор существенный вклад в модель. Значимость всех предикторов не превышает 0,05, что говорит о значимом вкладе каждого предиктора в модель. Чем больше значение  $t$  статистики и чем меньше показатель значимости, тем больший вклад данный предиктор вносит в модель. Как видно из таблицы 1, наибольший вклад в данную модель вносит объем кэша L3 процессора.

Стандартизированные коэффициенты  $\beta$  показывают относительную степень влияния предикторов. Не будучи привязанными к шкале предиктора, стандартизированные коэффициенты  $\beta$  позволяют определить наиболее значимый предиктор. В данном случае вновь наблюдаем, что объем кэша L3 процессора является наиболее значимым в данной модели.

Чем меньше доверительный интервал для  $\beta$ , тем ближе значение коэффициента  $\beta$  на данной выборке к значению этого же коэффициента для генеральной совокупности, и соответственно, тем лучше модель. Также стоит обратить внимание, что в данной модели нижняя и верхняя границы для доверительных интервалов  $\beta$  одного знака (за исключением константы). Это один из индикаторов хорошей модели: на разных выборках связь между зависимой и независимыми переменными сохраняется однонаправленной (одного знака). В таблице 2 приведена сводка для модели.

Таблица 2

**Сводка для модели**

$R$	$R$ -квадрат	Скорректированный $R$ -квадрат	Стд. Ошибка оценки
,939	,883	0,861	331,115

Коэффициент множественной корреляции  $R$  показывает связь зависимой переменной (производительности) с независимыми переменными, которые вошли в модель. Он принимает значение 0,939, что говорит о достаточно сильной связи.

$R$ -квадрат (коэффициент детерминации) составил 0,883, что говорит о том, что 88,3% дисперсии производительности обусловлены влиянием независимых переменных. Однако коэффициент детерминации не учитывает количество параметров в нашей модели,

поэтому следует перейти к рассмотрению скорректированного коэффициента детерминации, который учитывает количество предикторов в модели. Значение скорректированного  $R$ -квадрата меньше  $R$ -квадрата на 0,022, что говорит о хорошей обобщающей способности модели. Таким образом, наша модель объяснила бы только на 2,2% дисперсии меньше, чем модель, полученная исследованием генеральной совокупности. Стандартная ошибка оценки показывает стандартное отклонение ожидаемого значения зависимой переменной. Ее значение равно 331,115.

Для данной модели выполняются все базовые предположения: все независимые переменные, используемые в модели, являются количественными или дихотомическими; зависимая переменная является количественной и непрерывной, и все значения, которые она принимает, являются независимыми друг от друга. Также предикторы имеют ненулевую дисперсию; между независимыми переменными отсутствует мультиколлинеарность; остатки имеют нормальное распределение; дисперсия остатков гомоскедастична, автокорреляция отсутствует; моделируемая связь является линейной.

### **Заключение**

Использование полученной регрессионной модели производительности ноутбуков имеет большой потенциал. Так, выбор нового ноутбука вызывает огромные затруднения у большинства людей: производители представляют очень много различных характеристик устройств из-за которых покупатель теряется и не понимает, на какие параметры обращать внимание в первую очередь. Полученная модель выделяет 4 характеристики: объем оперативной памяти, объем кэшей L2 и L3, а также тактовая частота процессора. Более того, использование данной модели позволит предсказывать производительность того или иного ноутбука, не прибегая к реальному тесту производительности с использованием бенчмарка: достаточно знать параметры ноутбука. Это особенно актуально сейчас, когда большинство заказывает технику через сеть Интернет, предварительно не тестируя ее в магазине.

Тем не менее, при выборе ноутбука не стоит забывать о параметрах, которые не вошли в итоговую модель. Несмотря на то, что в данной выборке, на основе которой была построена модель, корреляция не вошедших предикторов с зависимой переменной относительно мала, эти параметры также оказывают влияние на производительность. Включение большого числа признаков, которые имеют незначительную корреляцию с зависимой переменной, ухудшило бы качество модели. Этим обусловлено наличие в итоговой модели только 4 предиктора из 12 исходных.

Перспективы дальнейшего исследования состоят в использовании нейронных сетей для построения модели. В таком случае, по исходной выборке сеть сама сформирует перечень параметров для обучения, а также функциональные связи. Однако для этого потребуется увеличение исходного набора выборки.

### **Список литературы**

1. Бююль А., Цёфель П. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. — СПб.: ДиаСофтЮП, 2005. — 608 с.
2. Наследов, А. IBM SP SS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных / А. Наследов. — СПб : Питер, 2013 . — 416 с.
3. Field, A. Discovering statistics using IBM SPSS statistics / A. Field. –5th ed. –Los Angeles [etc.]: SAGE Publications, 2018. –1070 с. –На англ. яз.
4. IBM Cognos Analytics документация [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/docs/ru/cognos-analytics> (дата обращения: 02.04.2022).

## СЕКЦИЯ ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

А.Я.КИРСАНОВ, А.И.СУЧКОВ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»  
ИМ. В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА), Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ

**Аннотация.** Рассматриваются способы аппроксимации полиномиальных функций с помощью нейронных сетей, а также изучаются алгоритмы Брауэра и Яо построения аддитивных цепочек. Проведенная оценка производительности алгоритмов вычисления полиномов определенных степеней дает возможности использования их, в зависимости от решаемой задачи и накладываемых ограничений.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, аддитивные цепочки, алгоритм Брауэра, алгоритм Яо, аппроксимация

Благодаря доступности огромных объемов обучающих данных и значительному увеличению вычислительной мощности ЭВМ, глубинные нейронные сети стали современной технологией для решения широкого круга практических задач машинного обучения. Нейронная сеть эффективно реализует отображение, приближающее полиномиальные функции, которая изучается на основе заданного набора пар значений ввода-вывода. Приближение значений функции — аппроксимация полиномами больших степеней работает достаточно медленно, когда используется большое количество перемножений. Чтобы сократить количество операций перемножения, нужно использовать такой способ вычисления степеней как аддитивные цепочки. В данной статье рассматриваются способы аппроксимации полиномиальных функций с помощью нейронных сетей, изучаются алгоритмы Брауэра и Яо построения аддитивных цепочек.

При аппроксимации полиномов больших степеней эффективнее использовать раскладывание степени на меньшие с помощью метода аддитивных цепочек [2]. Аддитивная цепочка длины  $l$  это последовательность из  $l$  чисел, где первое число это 1, а каждое последующее число — это сумма двух предыдущих чисел. Другими словами, последовательность  $c_0, c_1, \dots, c_\ell$  такая что  $c_0 = 1$  и для каждого  $k \in \{1, 2, \dots, \ell\}$  существуют  $i, j \in \{0, 1, \dots, k-1\}$  такие что  $c_k = c_i + c_j$ . Например, 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28, 56, 63 это аддитивная цепочка длины 8, потому что  $2 = 1+1$ ,  $3 = 2+1$ ,  $5 = 3+2$ ,  $7=5+2$ ,  $14=7+7$ ,  $28=14+14$ ,  $56=28+28$  и  $63 = 56+7$  [3]. Алгоритмы построения Брауэра и Яо являются одними из наиболее известных алгоритмов построения аддитивных цепочек.

Брауэр в 1939 опубликовал алгоритм, который вычисляет  $n$ -ю степень через  $\lg n + (1+o(1))(\lg n)/\lg \lg n$  умножений [5]. Кратчайшая аддитивная цепочка, содержащая  $n$ , имеет длину по крайней мере  $\lg n$ . Эрдеш доказал, что почти для всех  $n$  кратчайшая аддитивная цепочка для  $n$  имеет длину  $\lg n + (1+o(1))(\lg n)/\lg \lg n$  [4].

Цепь Брауэра фактически представляет собой семейство цепей, параметризованное положительным целым числом  $k$  и определяемая рекурсивно как

$$B_k(n) = \begin{cases} 1, 2, 3, \dots, 2^k - 1 & n < 2^k \\ B_k(q), 2q, 4q, 8q, \dots, 2^k q, n & n \geq 2^k, q = \lfloor n / 2^k \rfloor \end{cases}$$

Другими словами: запись  $n$  в системе счисления  $2^k$  как  $2^{jk}c_j + \dots + 2^{2k}c_2 + 2^k c_1 + c_0$  с  $c_j \neq 0$  [2]. Получается цепь  $1, 2, 3, \dots, 2^k - 1$ , затем  $2c_j, 4c_j, 8c_j, \dots, 2^k c_j$ , затем  $2^k c_j + c_{j-1}$ , затем  $2^{k+1}c_j + 2c_{j-1}, \dots, 2^{2k}c_j + 2^k c_{j-1}$ , затем  $2^{2k}c_j + 2^k c_{j-1} + c_{j-2}$  и так далее.

Цепь Брауэра имеет длину  $j(k+1) + 2^k - 2$  если  $jk \leq \lg n < (j+1)k$ . Длина минимизирована для  $k$  вблизи  $\lg \lg n - 2 \lg \lg \lg n$ . На рис. 1 показана цепь Брауэра для  $n = 31415$  при  $k = 3$ .

1	=	1 <sub>2</sub>	
2	=	10 <sub>2</sub>	
3	=	11 <sub>2</sub>	
4	=	100 <sub>2</sub>	
5	=	101 <sub>2</sub>	
6	=	110 <sub>2</sub>	
7	=	111 <sub>2</sub>	
14	=	1110 <sub>2</sub>	= 7 · 2
28	=	11100 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>2</sup>
56	=	111000 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>3</sup>
61	=	111101 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>3</sup> + 5
122	=	1111010 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>4</sup> + 5 · 2
244	=	11110100 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>5</sup> + 5 · 2 <sup>2</sup>
488	=	111101000 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>6</sup> + 5 · 2 <sup>3</sup>
490	=	111101010 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>6</sup> + 5 · 2 <sup>3</sup> + 2
980	=	1111010100 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>7</sup> + 5 · 2 <sup>4</sup> + 2 · 2
1960	=	11110101000 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>8</sup> + 5 · 2 <sup>5</sup> + 2 · 2 <sup>2</sup>
3920	=	111101010000 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>9</sup> + 5 · 2 <sup>6</sup> + 2 · 2 <sup>3</sup>
3926	=	111101010110 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>9</sup> + 5 · 2 <sup>6</sup> + 2 · 2 <sup>3</sup> + 6
7852	=	1111010101100 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>10</sup> + 5 · 2 <sup>7</sup> + 2 · 2 <sup>4</sup> + 6 · 2
15704	=	11110101011000 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>11</sup> + 5 · 2 <sup>8</sup> + 2 · 2 <sup>5</sup> + 6 · 2 <sup>2</sup>
31408	=	111101010110000 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>12</sup> + 5 · 2 <sup>9</sup> + 2 · 2 <sup>6</sup> + 6 · 2 <sup>3</sup>
31415	=	11110101011011 <sub>2</sub>	= 7 · 2 <sup>12</sup> + 5 · 2 <sup>9</sup> + 2 · 2 <sup>6</sup> + 6 · 2 <sup>3</sup> + 7

Рис. 1. Вычисление числа 31415 через 22 произведения.

1	=	1 <sub>2</sub>	
2	=	10 <sub>2</sub>	
4	=	100 <sub>2</sub>	
8	=	1000 <sub>2</sub>	
16	=	10000 <sub>2</sub>	
32	=	100000 <sub>2</sub>	
64	=	1000000 <sub>2</sub>	
128	=	10000000 <sub>2</sub>	520 = 1000001000 <sub>2</sub> = d(5)
256	=	100000000 <sub>2</sub>	1040 = 10000010000 <sub>2</sub> = 2d(5)
512	=	1000000000 <sub>2</sub>	2080 = 100000100000 <sub>2</sub> = 4d(5)
1024	=	10000000000 <sub>2</sub>	2600 = 101000101000 <sub>2</sub> = 5d(5)
2048	=	100000000000 <sub>2</sub>	4097 = 1000000000001 <sub>2</sub> = d(6)
4096	=	1000000000000 <sub>2</sub>	8194 = 10000000000010 <sub>2</sub> = 2d(6)
8192	=	10000000000000 <sub>2</sub>	16388 = 100000000000100 <sub>2</sub> = 4d(6)
16384	=	100000000000000 <sub>2</sub>	24582 = 110000000000110 <sub>2</sub> = 6d(6)
			27182 = 110101000101110 <sub>2</sub>

Рис. 2. Вычисление числа 27182 через 23 сложения.

Яо в 1976 опубликовал алгоритм, который, как и алгоритм Брауэра, вычисляет  $n$ -ю степень с помощью  $\lg n + (1 + o(1))(\lg n) / \lg \lg n$  умножений [6]. Выбирается положительное целое число  $k$ . Число  $n$  записывается в  $2^k$ -й системе счисления как  $2^{jk}c_j + \dots + 2^{2k}c_2 + 2^k c_1 + c_0$ , где  $c_j \neq 0$ . Вводится  $d(z)$  как сумма  $2^{ik}$  для всех  $i$ , где  $c_i = z$ .

Цепь Яо начинается с  $1, 2, 4, 8, \dots, 2^{\lfloor \lg n \rfloor}$ , складываются различные  $2^{ik}$  для того, чтобы получить  $d(z)$  для каждого  $z \in \{1, 2, 3, \dots, 2^k - 1\}$  такие, что  $d(z)$  был ненулевым. Затем берутся  $zd(z)$  для каждого  $z$ , и, наконец получается  $n = d(1) + 2d(2) + 3d(3) + \dots + (2^k - 1)d(2^k - 1)$ . На рис. 2 показана цепь Яо для числа  $n = 27182$  при  $k = 3$ .

Аппроксимация или приближение — научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми. Аппроксимация функции  $f(x)$  — это нахождение близкой к ней функции  $g(x)$ . Существуют различные критерии близости, в данной статье использовался mean absolute error (MAE), который вычисляется как  $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|$ , где  $n$  — длина вектора

предсказанных значений,  $Y$  — вектор значений предсказываемой переменной, а  $\hat{Y}$  —

вектор предсказанных значений. Критерий MAE используется для оценки качества аппроксимации путем сравнения его с заранее заданным параметром  $\varepsilon$ .

Глубинной нейронной сетью называют нейронную сеть с несколькими уровнями слоев между входным и выходным слоями, так называемые скрытые слои. Глубинные сети являются оптимальными аппроксиматорами для значительно различных классов функций, так как они обеспечивают теоретически оптимальную аппроксимацию очень широкого диапазона функций, в том числе полиномиальных. [1]

Реализованная нейронная сеть основана на архитектуре, предложенной в [1], являющаяся соединением архитектур сетей для аппроксимации операции умножения и возведения в степень. Такая сеть имеет конечную явно заданную ширину и масштабирование по глубине в зависимости от параметров полинома, а также функцию активации ReLU. Согласно теории, такая сеть аппроксимируется с точностью до ошибки  $\varepsilon$ . Эти требования приводят к экспоненциальной точности аппроксимации для отдельных сигналов, то есть ошибка аппроксимации экспоненциально спадает в количестве узлов сети. Формально, существует  $C > 0$ , что для всех  $m \in \mathbb{N}$ ,  $A \in \mathbb{R}_+$ ,

$p_m(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i$  где  $\max_{i=0, \dots, m} |a_i| = A$ ,  $D \in \mathbb{R}_+$  и  $\varepsilon \in (0, 1/2)$  существует сеть  $\Phi_{p_m, D, \varepsilon} \in \text{NN}_{\infty, \infty, 1, 1}$ , которая удовлетворяет неравенству

$$L(\Phi_{p_m, D, \varepsilon}) \leq Cm(\log(\lceil A \rceil) + \log(\varepsilon^{-1}) + m \log(\lceil D \rceil) + \log(m)), \quad W(\Phi_{p_m, D, \varepsilon}) \leq 16,$$

$$V(\Phi_{p_m, D, \varepsilon}) \leq \max\{A, 8\lceil D \rceil^{2m-2}\} \quad \text{и} \quad \|\Phi_{p_m, D, \varepsilon} - p_m\|_{L^\infty([-D, D])} \leq \varepsilon.$$

При использовании архитектуры в [1] не учитывались технические ограничения, такие как количество обучающих данных и алгоритм обучения, приведенная сеть, в частности, имеет меньшее количество слоёв, чем дает теоретическая формула  $L$ , что допускается теорией из-за нестрогого неравенства в данной формуле. Также, из-за технических ограничений, обучение сети и аппроксимация функций по ней были выполнены на отрезке  $[-1, 1]$ , то есть в формуле выше  $D = 1$ .

В данной работе на основе библиотеки Keras Python 3.9 была создана и обучена нейронная сеть для аппроксимации полиномов. Результаты проверки обучения нейронной сети, аппроксимирующей полином напрямую (стандартно), а также с помощью алгоритмов Брауэра и Яо (рис. 3 — 5). Было проведено сравнение времени работы алгоритмов Брауэра, Яо и стандартного алгоритма.

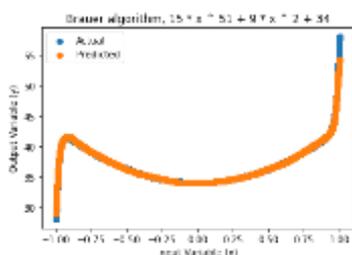


Рис. 3. Аппроксимация  $15x^{51} + 9x^2 + 34$  алгоритм Брауэра

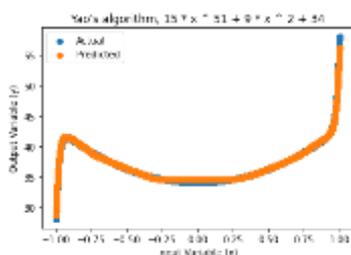


Рис. 4. Аппроксимация  $15x^{51} + 9x^2 + 34$ , алгоритм Яо

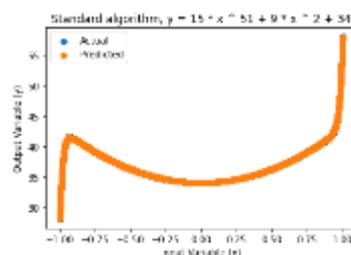


Рис. 5. Аппроксимация  $15x^{51} + 9x^2 + 34$ , стандартный алгоритм

Так, время выполнения аппроксимации функции  $15x^{51} + 9x^2 + 34$  с помощью алгоритма Брауэра составило 3190 секунд (рис. 3), с помощью алгоритма Яо составило 3158 секунд (рис. 4), с помощью стандартного алгоритма составило 10112 секунд (рис. 5).

Также отдельно были протестированы степени вида  $2^x$  (рис. 6 — 7). Для степеней вида  $2^x$  был использован алгоритм замены: пусть  $y = x^2$ , чтобы вычислить степень  $x^4$  берется  $z = y^2$ , для степени  $x^8$  берется  $z_1 = z^2$  и так далее. Была протестирована степень  $2^6$  и произведено сравнение времени работы алгоритма, описанного выше и стандартного алгоритма. Для числа  $2^6$  количество замен равно 5.

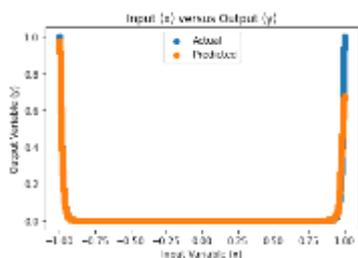


Рис. 6. Аппроксимация  $x^{64}$ , алгоритм замены.

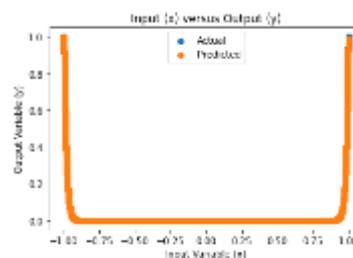


Рис. 7. Аппроксимация  $x^{64}$ , стандартный алгоритм.

Время работы алгоритма замены составило 1924 секунды (рис. 6) при аппроксимации функций степеней  $x^2 \dots x^{64}$ . Представлены результаты аппроксимации  $x^{64}$  с помощью стандартного алгоритма (рис. 7), время работы составило 22025 секунд.

В результате реализации нейронной сети для аппроксимации полиномиальных функций в архитектуру были внесены изменения согласно техническим ограничениям системы, на которой обучалась нейронная сеть. Так были наложены ограничения на количество слоёв, эпох и размер массива обучающих данных. Тем не менее, реализованная архитектура осталась в рамках теоретической.

Тестирование и сравнение качества обучения, времени работы нейронной сети при использовании различных алгоритмов (стандартного, алгоритмов Брауэра и Яо) показало возможности использования их при различных задачах и ограничениях. Так время работы программы наименьшее при использовании алгоритма Яо, но при этом и качество обучения, которое измерялось с помощью метрики MSE, наименьшее. Промежуточное значение по времени и качеству обучения дал алгоритм Брауэра, а наилучшее качество обучения обеспечил стандартный алгоритм без разложения степени, но при этом он занял наибольшее время работы. При сравнении скорости работы программы (быстродействия) на степенях вида  $2^x$  получены теоретически предсказуемые результаты. Наименьшее время аппроксимации показал алгоритм замены переменных, а наибольшее — алгоритм, не использующий замену переменных.

### Список литературы

1. Deep Neural Network Approximation Theory / Philipp Grohs, Dmytro Perekrestenko, Dennis Elbrachter и др. // IEEE Transactions on Information Theory. 2021, вып. 5. — С. 2581-2623.
2. Daniel J. Bernstein. Pippenger's exponentiation algorithm // <http://cr.yp.to/papers.html#pippenger>. 2002. С. 21.
3. Cybenko G. Approximation by superpositions a sigmoidal function // Mathematics of Control, Signals and Systems. 1989, вып. (№) 4. — С. 303-314.
4. Erdos P.. Remarks on number theory III: On additional chains // Acta Arithmetica. 1960, № 6. — P. 77-81.
5. Brauer A. On addition chains // Bulletin of the American Mathematical Society. 1939, № 45. — P. 736-739.
6. Andrew C. Yao. On the evaluation of powers // SIAM Journal on Computing. 1976, № 5. — P. 100-103.

## АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТАКТИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА В ВИРТУАЛЬНОМ ФУТБОЛЕ

Н.С. ЛУКАШОВ, А.А. БЕЛЯЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Рассмотрен алгоритм планирования тактического действия интеллектуального агента в многоагентной среде. Разработанный алгоритм реализует планирование игроком проброса мяча в сторону игрока соперника на максимально возможное расстояние с учетом влияния динамически изменяющихся неопределенных условий окружающей среды.

*Ключевые слова:* интеллектуальный агент, многоагентная система, виртуальный футбол, проброс мяча.

### **Введение**

Многоагентные системы (МАС) являются одним из магистральных направлений развития искусственного интеллекта (ИИ) [1]. При создании автономных интеллектуальных агентов (ИА) необходимо решать проблему планирования действий в многоагентных мирах. В ИИ разработано множество подходов и методов планирования действий при различных допущениях [2, 3]. Планирование в МАС является наиболее сложным случаем, так как должно выполняться в реальном времени в непрерывно меняющейся среде в условиях неполной информации о ее состоянии [4].

Алгоритм планирования тактического действия ИА разработан для среды виртуального футбола Robosoccer [5]. Данная среда является наиболее известной и всемирно признанной платформой отработки тактик группового поведения в условиях командного противодействия в режиме реального времени.

В среде Robosoccer неопределённость динамического мира моделируется, в частности, за счет внесения сервером RoboCup в каждом такте моделирования «шумов» в движение объектов и параметры совершаемых агентами действий. Шум моделируется случайной величиной, добавляемой к параметру выполняемой команды или вектору движения объектов.

Игрок футбольной команды, являющейся интеллектуальным агентом, в процессе игры должен планировать свои тактические действия. Один из базовых типов действия — ведение мяча. Существует два типа ведения мяча: ведение пробросом и ведение с постоянным удержанием мяча в ногах. Методы планирования и реализации этих типов ведения имеют свои особенности. В данной работе рассматривается первый тип ведения, при котором игрок пробрасывает мяч в выбранном направлении на некоторое расстояние и в течение нескольких тактов догоняет его. Предполагается, что проброс выполняется на максимально возможное расстояние в сторону игрока соперника. Ключевое требование при выполнении данного действия: игрок должен гарантировано добежать до мяча раньше любого из игроков соперника.

Планирование тактических действий выполняется в ментальном цикле агента и предполагает вычисление его параметров в соответствии с подходом опережающего итеративного планирования [4]. При этом параметры действий итеративно уточняются в каждом такте обдумывания до момента достижения игроком мяча, когда осуществляется выбор лучшего тактического действия, т.е. имеющего максимальную оценку полезности.

### Постановка задачи

При решении задачи планирования ведения мяча используются следующие параметры игрока: координаты расположения на поле, направление взгляда, направление тела, область, в которой игрок может ударить мяч (*kickable\_area*), запас сил (*stamina*). Параметры мяча, используемые при решении задачи: начальная скорость влета мяча в *kickable\_area*, направление вектора скорости, положение мяча в *kickable\_area* игрока.

Игрок определяет координаты точки проброса мяча, исходя из положения противника. Точка проброса  $D^*$  должна удовлетворять следующему требованию: *игрок гарантировано достигает её раньше игрока соперника при любых возможных исходах*.

Планирование должно выполняться в предположении худшего случая — в каждом такте движение объектов подвергается максимальному воздействию шумов. При этом шумы, воздействующие на мяч, максимально отдаляют его от догоняющего игрока как по дальности, так и по азимуту, а шумы, воздействующие на игрока, максимально замедляют его продвижение к мячу.

С учетом этого, постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо определить параметры удара по мячу таким образом, чтобы при худшем случае воздействия шумов мяч достиг рассчитанной точки проброса за то же число тактов, за которое ее может достичь игрок при условии, что соперник за то же число тактов не успеет достичь этой точки.

### Метод решения задачи

Назовем *областью достижимости* за  $N$  тактов область поля, в которой может оказаться объект (мяч или игрок) через  $N$  тактов с учетом вносимых сервером шумов.

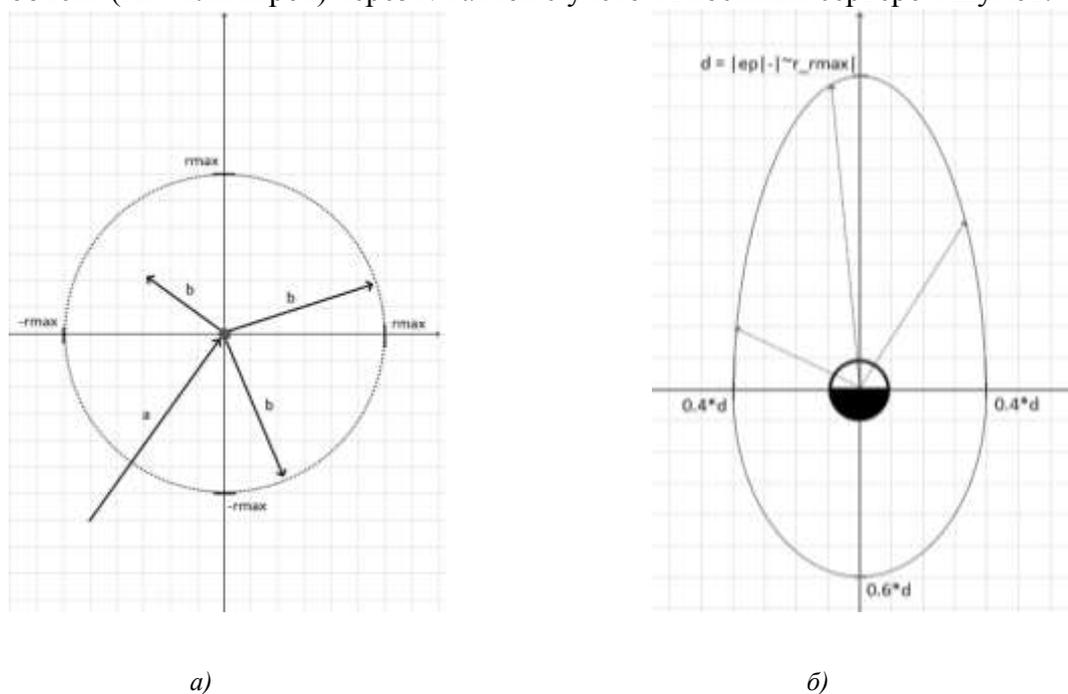


Рис. 1. Области достижимости мяча (а) и игрока (б).

На рис. 1а показана возможная область достижимости мяча за  $N$  тактов при воздействии на вектор «а» движения мяча случайного вектора возмущения «b».

Область достижимости игрока за один такт (рис. 1, б) строится по модулю вектора реального движения игрока «d», уменьшенного из-за замедления движения, вызванного возможным ускорением не по направлению тела (коэффициенты замедления 0.4, 0.6 и т.д.), а также из-за воздействия максимального модуля вектора шума («~r\_max»), направленного противоположно вектору движению игрока («ер»).

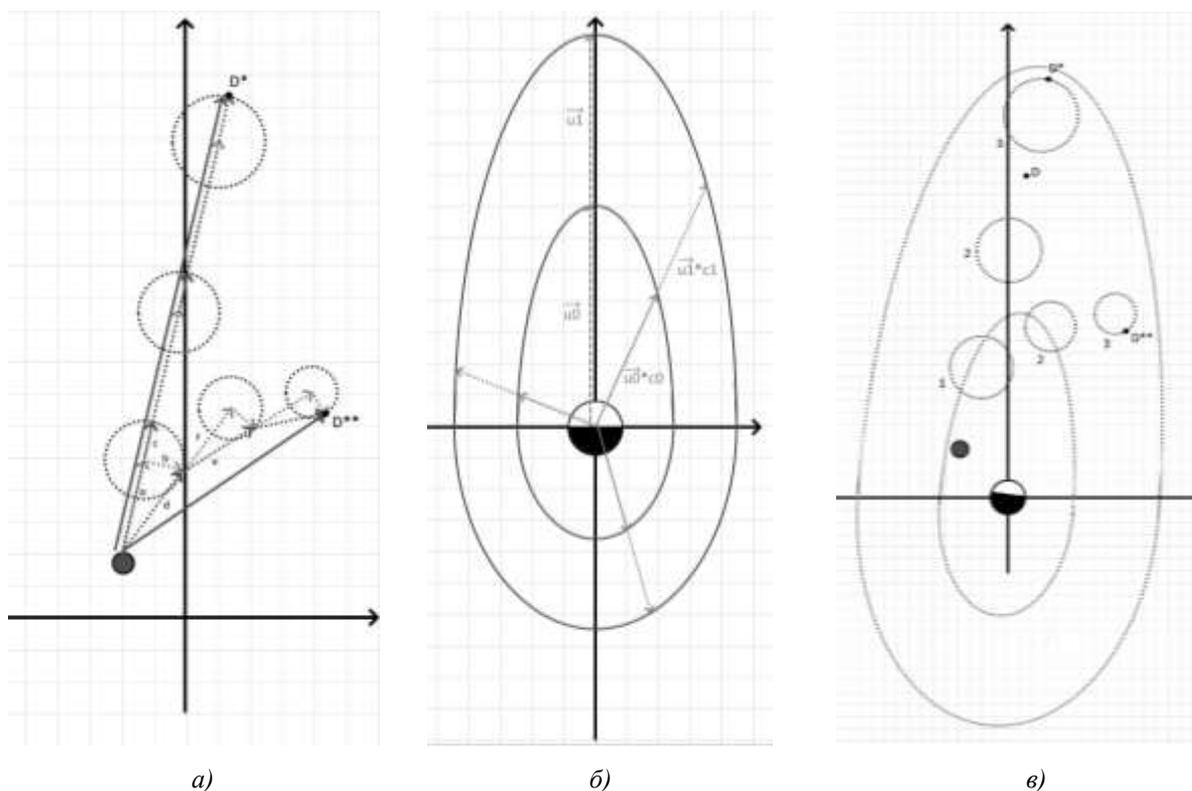


Рис. 2. Области достижимости мяча(а), игрока(б) и общие(в) за три такта.

На рис. 2 показан пример движения мяча (а), игрока (б) и их совместного движения (в) в течение трех тактов.

В первом такте мяч может продвигнуться вперед при воздействии максимально возможного вектора шума «b» либо на величину вектора «с» — случай максимального отдаления мяча от номинального (невозмущенного) движения, либо на величину вектора «d» — случай максимального отклонения мяча по азимуту. В каждом последующем такте векторы движения рассчитываются аналогично. Таким образом, за три такта мяч имеет два наихудших положения вследствие воздействия шумов — точка D\* и D\*\*.

Область достижимости игрока расширяется в каждом такте путем увеличения модуля вектора движения игрока на предыдущем такте на величину модуля вектора движения на текущем такте. Таким образом, область достижимости игрока за два такта при его движении на этих тактах под одним и тем же углом представлена внешней областью, изображенной на рисунке 2, а. Если же игрок в определенном такте захочет изменить угол своего движения, области достижимости перестраиваются относительно новых условий.

Зная законы возмущенного движения мяча и игрока, рассмотрим их совместное движение. На рис. 2, в показана точка D, в которую мяч прилетит при невозмущенном движении. Игрок способен гарантировано достичь мяча за 3 такта, если точки D\* и D\*\*,

соответствующие худшему случаю, попадают внутрь внешней второй области достижимости игрока.

Формулы движения объектов представлены в [5]. При определении числа тактов  $N$ , за которые планируется догнать мяч, используются базовые формулы движения, модифицированные с учетом возможных шумов. В частности, модуль необходимого начального ускорения мяча, выведенный на основе базовых формул, равен:

$$a_0 = \frac{-(b+1)v_0 \sum_{k=0}^{N-1} ((b+1)^k n^k) + D^* - p}{\sum_{k=0}^{N-1} ((b+1)^k n^k)}$$

где  $b$  — постоянная величина воздействия шумов,  $n$  — коэффициент замедления,  $D^*$  — расстояние до точки проброса,  $p$  — начальное положение мяча,  $v_0$  — начальная скорость влета мяча.

#### Алгоритм расчета параметров ведения мяча

1. Определить точку  $D^*$ , такую что игрок достигает её раньше, чем игроки-соперники. Точка  $D^*$  должна находиться на максимально возможном расстоянии от игрока в сторону ближайшего игрока соперника.

2. Определить число тактов  $N$ , за которые игрок достигает точки  $D^*$ .

3. Зная координаты точки  $D^*$  и количество тактов  $N$ , определить начальную скорость  $v_0$ , которую необходимо передать мячу для того, чтобы он смог за  $N$  тактов долететь до  $D^*$  с учетом максимального возмущения по расстоянию.

4. Зная начальную скорость мяча, определить точку  $D^{**}$ , в которую мяч прилетает, если на него оказывают влияния максимальные возмущения по азимуту, а также точку  $D$ , в которую мяч прилетает в случае невозмущенного движения.

5. Сформировать область достижимости игрока и проверить возможность достижения точки  $D^{**}$  за  $N$  тактов. Если такая возможность есть — начальные параметры проброса определены. Если нет, увеличить количество тактов для достижения точки  $D^{**}$  на единицу ( $N + 1$ ). Проверить, достигает ли игрок соперника за  $N+1$  такт точек  $D^*$  и  $D^{**}$  раньше нас. Если нет, возврат к пункту 3 алгоритма. Если да, приблизить точку  $D^*$  к себе на заданную величину, сохранить количество тактов  $N$  и перейти к пункту 3 алгоритма.

#### Заключение

Разработанный алгоритм планирования и реализации ведения мяча экспериментально апробирован с использованием локальной моделирующей программы. В настоящее время выполняется интеграция разработанного функционала в целевой проект интеллектуального агента для среды виртуального футбола. Дальнейшее развитие предполагает разработку и реализацию алгоритмов для других типов ведения мяча.

#### Список литературы

1. Gorodetsky V., Panteleev M. Networks of Autonomous Agents Operating in an Adversary Environment: Basic Features of the Conceptual Model// J. Phys.: Conf. Ser., 2021, 10 p.
2. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1864/1/012079/pdf>
3. Kattepur A., Balamuralidhar P. RoboPlanner: Towards an Autonomous Robotic Action Planning Framework for Industry 4.0. 2019. 13 P. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02284497/document>)
4. Sabbadin R., Teichteil-Königsbuch F., Vidal V. Planning in Artificial Intelligence// In book: A Guided Tour of Artificial Intelligence Research, Volume II: AI Algorithms, May 2020, pp. 285-312.

5. Пантелеев М.Г. Формальная модель опережающего итеративного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени// Труды 14-ой Нац. Конф. по ИИ с международным участием КИИ-2014. Т 1. — Казань: Изд-во РИЦ «Школа». — 2014. — С. 323-333.
6. Официальный сайт RoboCup [Электронный ресурс]: режим доступа- <http://www.roboocup.org>.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БИЗНЕС-ИНСТРУМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ REST API

Д.А. УШАКОВ

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
им. Н. П. Огарёва*

**Аннотация.** В работе рассматривается организация взаимодействия различных систем и сервисов с помощью REST API. В качестве примеров приведены разработанные автором решения для интеграции CRM-системы Битрикс24 с такими сервисами, как Telegram и Google Sheets. Также в статье описано создание полуавтоматического загрузчика товарных позиций в сделки в систему Битрикс24.

*Ключевые слова:* бизнес-инструмент, API, взаимодействие систем, интеграция, Битрикс24.

### **Введение**

Сегодня, в век информационных технологий существует огромное множество различных инструментов для упрощения деятельности человека. Отдельную группу этих инструментов составляют бизнес-инструменты: системы учёта, офисные приложения, различные системы автоматизации бизнеса. Когда организация пользуется большим количеством инструментов, зачастую возникает необходимость наладить их взаимодействие. Конечно, существует много «упакованных» решений по интеграции сервисов друг с другом, однако, так же часто у компаний возникает необходимость интегрировать сервисы, для которых ещё не существует готового решения, но есть открытый API. В таких случаях нам и пригодится знание о том, как сервисы могут взаимодействовать друг с другом при помощи REST API.

Для упрощения ведения бизнеса в настоящее время чаще всего используются следующие системы: ERP, CSM, CRM, KPI, BPM, PMS и другие. В статье в качестве примера будет продемонстрирована интеграция различных сервисов с CRM-системой Битрикс24. В целом, CRM-система — это инструмент, позволяющий управлять и контролировать взаимодействие компании с клиентами. В этой системе ведётся история сделок, звонков, писем и прочих контактов с клиентами. Также она позволяет хранить данные о клиентах: как о постоянных, так и о тех, кто только планирует покупку и проявлял определенный интерес (написал в чат, позвонил и так далее).

### **Постановка задачи**

Чаще всего, с CRM интегрируют системы учёта (например, 1С), телефонию (офисные и облачные АТС), сервисы СМС рассылок и мессенджеры. Так как такие интеграции пользуются большой популярностью, разработчики подобных сервисов сами пишут интеграции с популярными CRM-системами. Но что, если компания пользуется непопулярным сервисом или требуется нестандартное решение? В таком случае на помощь приходит открытый API интегрируемого сервиса в связке с удобным для разработчика языком программирования.

## **О работе API и языках программирования**

API — это набор инструментов, с помощью которых один сервис может взаимодействовать с другим [1]. REST — это технология, позволяющая получать и изменять данные удаленных приложений, передавая HTTP вызовы через сеть [2]. Другими словами, с помощью URL можно получить и модифицировать данные в той или иной системе с открытым API.

Многие популярные сервисы имеют открытый API, чтобы не ограничивать своих пользователей в возможности доработки продукта под свои нужды. Кстати, касается это не только инструментов для бизнеса, но и многих сервисов, например, открытый API для написания ботов имеет мессенджер Telegram. Реализуется API в большинстве случаев с помощью методов, которые обычно описаны в информации для разработчиков.

В источнике, содержащем методы API Битрикс24, приводятся примеры использования этих методов на языке PHP. Однако, в результате проведенного анализа языков программирования, применяемых для интеграции разнотипных приложений с помощью REST API, был выбран язык программирования Python, превосходящий PHP по нескольким используемым для сравнения критериям.

### **Структура REST-запроса**

При построении запроса необходимо обратиться к сервису, который их обрабатывает. Так, для Битрикс24 это будет раздел непосредственно портала, а для Telegram — отдельная страница по адресу [api.telegram.org](https://api.telegram.org).

Чтобы система однозначно идентифицировала нас и поняла, что мы имеем доступ к методам API, в запросе необходимо передавать специальный ключ, который выдаётся при создании вебхука/бота.

За ключом следует сам метод, который можно найти в справочной литературе.

Завершением запроса являются параметры метода, если они, конечно, имеются.

### **Пример разработки. Уведомление в Telegram о новой сделке в CRM Битрикс24**

Рассмотрим пример интеграции мессенджера Telegram, имеющего открытый API, с CRM-системой Битрикс24 для оптимизации протекания информационных процессов в бизнесе.

В бизнесе часто возникают ситуации, когда необходима оперативная реакция на появляющиеся сделки: позвонить клиенту, ответить на его письмо и прочее. Что, если ответственный за входящий поток сотрудник отошёл от компьютера, отлучился на обед. Существующее мобильное приложение данной системы не является достаточно удобным для решения подобных задач. Для этого необходим эффективный и привычный способ получения уведомления из системы — такой как мессенджер. На сегодняшний день одним из самых популярных мессенджеров является Telegram. Поэтому была реализована связка Битрикс24-Telegram с помощью REST-запросов, выполняемых к обоим сервисам. Для создания таких запросов необходим специальный ключ, получаемый со стороны Telegram с помощью специального бота, а со стороны Битрикс24 — с помощью созданного входящего вебхука. Опишем подробно реализацию данного процесса.

Вначале было добавлено скрытое поле «Уведомление отправлено» в Битрикс24 типа Да/Нет для отметки об уже отправленных уведомлениях. После этого был создан входящий вебхук и получен ключ для интеграции. Для получения информации о новых сделках был использован метод «`crm.deal.list`»[3], в фильтре которого указывается дата

создания: сегодня и Уведомление отправлено: нет или не указано. В ответ мы получаем список сделок, созданных сегодня и по которым уведомление ещё не отправлено. И в завершение с помощью метода «crm.deal.update» было установлено в полученных сделках значение «Да» в поле «Уведомление отправлено». На следующем шаге реализации был создан бот в Telegram и также получен ключ для выполнения интеграции. Созданный бот был добавлен в группу с сотрудниками, которые должны будут получать эти уведомления. Для получения ID диалога и последующей отправки в него сообщений был использован метод «getUpdate»[4], а для непосредственной отправки сообщений — метод «sendMessage». В отправляемом сообщении передается информация с названием сделки и ссылкой на неё. Ссылка состоит из постоянной части, в которой указано название портала и раздел (в текущем варианте «сделки»), и переменной части, в которой указан ID сделки, получаемый при использовании метода «crm.deal.list».

Написанный код был размещен в бесконечном цикле с паузой в 30 секунд. Данное время было выбрано в качестве оптимального по скорости реакции на новую сделку и степени загрузки сервера.

Далее разработанное приложение было собрано в исполняемый файл и зарегистрировано на собственном сервере в качестве службы. В этом случае операционная система выполняет отслеживание запущенной службы, и в случае возникшей ошибки выполняет перезапуск приложения.

По окончанию описанных работ был получен обработчик, постоянно выполняемый на сервере. При появлении в системе новой сделки, в поле «Уведомление отправлено» которой ничего не указано, он отправляет сообщение в Telegram-чат с сотрудниками, которые должны оперативно обработать сделку.

### **Прочие примеры разработки. Отчёт в Google-таблицах**

Штатная отчётность Битрикс24 не даёт полной картины, в связи с чем возникает необходимость генерации отчётов на базе другого сервиса, но уже со всей требуемой информацией. Решением такой задачи будет являться отчёт, информация в который будет поступать напрямую из Битрикс24 с помощью REST API. Таким отчётом может стать таблица Microsoft Office Excel. Однако в этом случае данный отчёт будет доступен для редактирования только на том компьютере, на котором будет выполняться написанная программа. Чтобы отчёт был доступен всегда и на любом устройстве, в том числе на смартфоне, предлагается создавать его на основе Google-таблиц. Рассматриваемый сервис также имеет открытый API.

Так как данный отчёт собирается один раз в день, нецелесообразно делать постоянное обновление данных. Предлагаемый механизм обновления был реализован с помощью считывания значения из определённой ячейки: когда в ячейке будет строка «Обновить» — программа запускает обновление.

При создании данного приложения также необходимо получать специальные ключи от обоих сервисов. С помощью нескольких API методов («crm.deal.list», «batchGet», «batchUpdate»[5]) был реализован сбор информации из Битрикс24 и её загрузка в Google-таблицы. В результате было реализовано приложение, которое с интервалом в 30 секунд отслеживает значение в поле, отвечающем за обновление отчёта, и запускает обновление, когда в отслеживаемой ячейке пользователь выбирает из списка «Обновить». Таким образом, с помощью данного отчёта можно получить необходимую актуальную

информацию из Битрикс24 из любого местоположения и с любого устройства, имеющего выход в Интернет.

### **Прочие примеры разработки. Полуавтоматическая загрузка компаний в Битрикс24**

При работе в Битрикс24 часто возникает необходимость заполнить товарные позиции в сделках в соответствии с учётной системой. Если учётная система не интегрирована с Битрикс24, можно реализовать полуавтоматический загрузчик. Полуавтоматическим он считается потому, что для загрузки товаров из Excel-файла его необходимо предварительно поместить в определённую папку.

Требуется, чтобы товары загружались в сделку в соответствии с учётной системой с несколькими условиями: если товарная позиция существует в каталоге Битрикс24, то она должна быть выбрана, если данная позиция отсутствует, то она должна быть добавлена.

Написанное приложение отслеживает появление Excel-файла в указанной директории с интервалом 15 секунд. При появлении файла, данные из него автоматически считываются в переменные. Далее с помощью методов API («read\_excel», «crm.product.add», «crm.item.productrow.add», «crm.product.list», «crm.product.update») Битрикс24 выполняет поиск товара. Если искомый товар отсутствует в каталоге, то он автоматически создаётся со всеми свойствами, указанными в Excel-файле, если же он найден, то информация о нём просто обновляется. Затем данный товар добавляется в сделку в том количестве, которое указано в исходном файле, а сам исходный файл в случае успешной загрузки удаляется. При возникновении ошибок файл переносится в отдельную папку, а в консоли отображается сообщение с описанием ошибки.

### **Заключение**

В данной работе был рассмотрен механизм взаимодействия систем на примере интеграции CRM-системы Битрикс24 с Telegram и Google-таблицами. С их помощью было продемонстрировано, что при отсутствии готовых решений или при решении нетиповых задач можно организовать интеграцию систем методами REST API, создав максимально удобное и эффективное адаптированное решение. В статье основное внимание уделено бизнесу и интеграции инструментов для оптимизации его ведения, однако, сфера использования API им не ограничивается и может эффективно применяться при создании решений и в других областях деятельности.

### **Список литературы**

1. API — Википедия [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/API> (дата обращения 10.02.2022)/
2. Rest API: что это такое [Электронный ресурс] URL: <https://mcs.mail.ru/blog/vvedenie-v-rest-api> (дата обращения 12.02.2022)/
3. Документация по REST [Электронный ресурс] URL: [https://dev.1c-bitrix.ru/rest\\_help/](https://dev.1c-bitrix.ru/rest_help/) (дата обращения 15.03.2022)/
4. Telegram Bot API [Электронный ресурс] URL: <https://core.telegram.org/bots/api> (дата обращения 18.03.2022)/
5. Sheets API | Google Developers [Электронный ресурс] URL: <https://developers.google.com/sheets/api> (дата обращения 21.03.2022)/

## СЕКЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА

### ВИЗУАЛИЗАТОР НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГРАФА ПЛОСКИХ РАЗБИЕНИЙ

В.О. ДУБОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Граф плоских разбиений — бесконечный ориентированный градуированный граф, в вершинах которого расположены трёхмерные диаграммы Юнга, а рёбра связывают вложенные друг в друга диаграммы, отличающиеся одним кубом. В рамках работы была написана программа, включающая в себя вывод диаграмм как в виде кубов, так и в виде точек. Были реализованы функции для раскраски вершин графа по размерностям и номерам уровней, отображение заданных пользователем путей на графе с выводом оригинального графа, отображение заданных пользователем путей на графе с окрестностями без вывода оригинального графа, отображение подграфов с выводом оригинального графа и без вывода оригинального графа. Программный пакет может использоваться для исследования путей и процессов на графе Юнга.

*Ключевые слова:* Диаграмма Юнга, граф Юнга, плоские разбиения, визуализатор, визуальное представление, асимптотическая комбинаторика.

Графы Юнга [1] являются предметом исследований в современных работах по асимптотической комбинаторике [2-4]. Данная работа посвящена разработке программы, визуализирующей начало графа плоских разбиений или трёхмерного графа Юнга.

Граф плоских разбиений — бесконечный ориентированный градуированный граф, в вершинах которого расположены трёхмерные диаграммы Юнга, а рёбра связывают вложенные друг в друга диаграммы, отличающиеся одним кубом. Корень графа Юнга — единичный куб. Размерность диаграммы — количество путей из корня графа Юнга в данную диаграмму [5].

Для хранения трёхмерных диаграмм Юнга использовался двумерный массив, в ячейки которого записывались высоты столбцов. Для визуализации был разработан следующий алгоритм построения графа плоских разбиений:

Пользователь задаёт число отображаемых уровней графа  $n$ .

В файл записываются координаты корня графа  $(0, 0, 0)$ .

Для  $i = 1, 2, \dots, n-1$  уровня создаётся массив диаграмм  $D$ . Программа проверяет каждую диаграмму  $\lambda_i$  на возможность добавления к ней нового куба.

Если диаграмма  $\lambda_{i+1}$  уже присутствует в массиве  $D$ , то отображается стрелка между диаграммами  $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$ . Если диаграммы  $\lambda_{i+1}$  в массиве нет, то её координаты записываются в файл и она добавляется в массив.

Для каждого перехода  $\lambda_i \nearrow \lambda_{i+1}$  координаты кубов диаграммы вычисляются из координат диаграммы  $\lambda_i$  и координат добавляемого куба по формулам (1).

6. По файлу с координатами строится граф.

С увеличением количества уровней диаграммы начинают отрисовываться поверх уже существующих и перекрывать друг друга. Чтобы этого избежать, формулы в пункте 5 выбираются в зависимости от количества выводимых уровней и способа вывода (точками или кубами). Например, для случая вывода кубами  $n < 6$  уровней графа плоских разбиений, формула для  $x$  будет следующая:

$$x'' = x + (((x' > 0) \text{AND} ((y' > 0) \text{OR} (z' > 0))) + ((y' = 0) \text{AND} (z' = 0)) * 2) * n, \quad (1)$$

где  $x$  — координата диаграммы  $\lambda_i$ ,  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  — координаты добавляемого куба,  $x''$  — координата диаграммы  $\lambda_{i+1}$ .

Помимо вышеописанной визуализации начала графа плоских разбиений в программе реализован ряд функций:

Раскраска графа по уровням (рис. 1а). Цвет диаграммы определяет уровень, которому она принадлежит. Красный цвет соответствует первому уровню, белый — последнему, а оттенки розового равномерно распределяются по уровням между ними.

Раскраска графа по размерностям. На каждом уровне определяется максимальная размерность — ей назначается красный цвет, минимальной — белый. Между остальными размерностями распределяются оттенки розового.

Отображение диаграмм в виде точек. Благодаря тому, что перекрытие диаграмм в виде точек меньше, чем у диаграмм в виде кубов, можно вывести больше уровней графа без перекрытия диаграмм.

Отображение заданных пользователем путей на графе с выводом оригинального графа. Задаётся вершина начала пути. Из файла последовательно берутся координаты добавляемых кубов, и если  $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$  принадлежат пути, то стрелка между ними выделяется синим цветом.

Отображение заданных пользователем путей на графе с окрестностями без вывода оригинального графа (рис. 1б). Задаётся вершина начала пути. Из файла последовательно берутся координаты добавляемых кубов, через получившиеся диаграммы рисуется путь и его окрестности. При этом остальной граф не отображается и не строится.

Отображение подграфов графа плоских разбиений с выводом оригинального графа. Пользователем задаётся корень подграфа, и если  $\lambda_i$  принадлежит подграфу, то все стрелки к  $\lambda_{i+1}$  диаграммам выделяются синим цветом.

Отображение подграфов графа плоских разбиений без вывода оригинального графа. Пользователем задаётся корень подграфа, и выводятся только диаграммы, принадлежащие этому подграфу.

Программа была написана на языке C++, работа проводилась в операционной системе Linux. В качестве визуализатора использовалась утилита `gnuplot v.5.2`. В будущем программный пакет может использоваться для исследования путей и процессов на графе Юнга. Планируется дальнейшая доработка программы и улучшение работы уже существующих функций.

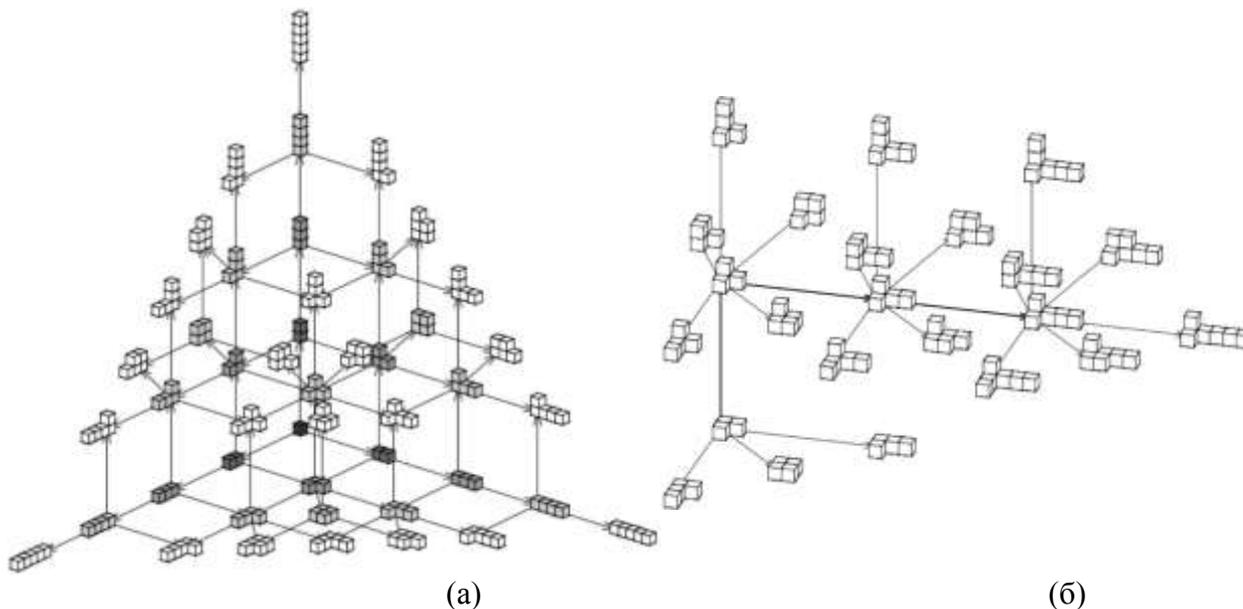


Рис. 1. Примеры а) 5 первых уровней графа плоских разбиений с раскраской по уровням, б) отображения заданного пути с окрестностями и без оригинального графа.

### Список литературы

1. Уильям Ф. Таблицы Юнга и их приложения к теории представлений и геометрии // М. : МЦНМО. 2006
2. Васильев Н. Н., Дужин В. С. Численное исследование асимптотики вероятностей путей в близком к центральному марковском процессе на трехмерном графе Юнга // Зап. научн. сем. ПОМИ. 2016. Том 448. С. 69-79
3. Duzhin V., Vasilyev N. Modeling of an asymptotically central Markov process in 3D Young graph // Mathematics in Computer Science. 2017. Vol.11. P.315-328
4. Okounkov A., Reshetikhin N. Correlation function of Schur process with application to local geometry of a random 3-dimensional Young diagram // J. Amer. Math. Soc. 2003. Vol. 16. P. 581-603
5. Васильев Н. Н., Дужин В. С. Построение неприводимых представлений симметрической группы  $S(n)$  с большими и максимальными размерностями // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 17–22. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.17

## ВЫЯВЛЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОВЫШЕНИЯ НАУКОМЕТРИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ

Р.П. ЧЕРЕПАНОВ, Д.С. ЕМЕЛЬЯНОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** Цель исследования состоит в нахождении коллективов авторов, недобросовестно повышающих свои наукометрические показатели путем частого взаимного цитирования. Если составить граф цитирований, где вершинами будут выступать авторы, а ребра — отношением «автор процитировал автора», то такими подозрительными коллективами могут быть клики, на которые есть мало ссылок от других авторов, а внутренних ссылок, наоборот, много. В ходе проекта были получены метаданные о научных публикациях из сервиса «Crossref», проведена их фильтрация и приведение к нужному виду с последующей загрузкой в локальную базу данных MySQL. После этапа переноса данных были выделены ориентированный граф цитирований и его компоненты связности, найдены максимальные клики и проведен анализ их параметров.

*Ключевые слова:* «Crossref», наукометрия, социальный граф, клика, алгоритм Брона-Кербоша, прикладные задачи на графах, теория графов, базы данных

## **Введение**

Использование системы наукометрии, включая разнообразные индексы цитируемости и поощрение наукометрических показателей, неизбежно привело к появлению авторов и коллективов, эксплуатирующих эту систему. Такими коллективами могут быть несколько авторов, ссылающихся друг на друга по договоренности. Выявление таких групп авторов позволит бороться с недобросовестным повышением индексов цитируемости, что и является целью работы.

Представив данные об авторах в виде графа цитирований, где вершины — это авторы, а взвешенные направленные ребра — это количество цитирований одного автора другим, можно найти клики авторов — полные подграфы — и узнать, работы каких коллективов цитируются более часто или редко. Авторы, привлекающие мало чужого внимания, но при этом очень часто цитирующие других участников клики, вероятно, недобросовестно повышают друг другу свои индексы цитирования.

## **Построение графа цитирований**

Чтобы построить граф цитирований, необходим массив библиографических данных о различных работах, их авторах, цитированиях и так далее. Такие данные предоставляются различными специализированными сервисами. В рамках данной работы был использован дамп базы данных «Crossref» 2019 года.

Запись в базе содержит большое количество данных о статье, но для построения графа интересна лишь небольшая часть из них: уникальный идентификатор работы DOI, список авторов, список ссылок на другие работы, область науки, которой посвящена работа.

Авторы представлены без уникальных идентификаторов, поименно. Предполагается, что авторы с полностью совпадающими именами — это один и тот же человек. Кроме того, если два автора с одинаковой фамилией и одинаковыми инициалами ссылаются друг на друга, но у одного имя записано полностью, а у другого только первыми буквами, считается, что это один человек (если нет другой такой связи).

Данные хранятся в базе, разбитой на таблицы: таблица работ, авторов, отношений «автор написал работу», «работа ссылается на работу» и т.д. Сначала по загруженному дампу записываются авторы и все работы из выбранной области науки, затем заполняется таблица ссылок авторов на авторов и работ на работы.

После этого сливаются авторы, инициалы и фамилии которых совпадают, если между ними есть цитирование и такое совпадение однозначно.

Далее выделяется неориентированный граф цитирований. В нем сохраняются только те ребра, которые направлены в обе стороны. Кроме того, можно ограничить минимальные веса ребер из начального графа, которые могут образовать ребра в новом графе. Эти ограничения позволяют значительно ускорить процесс обработки, уменьшив количество ребер, однако самые недобросовестные коллективы авторов по-прежнему будут выделены, так как количество цитирований между собой у них, предположительно, достаточно велико.

На полученном графе выделяются компоненты связности: это позволяет разделить задачу обработки на меньшие части.

После выделения компонент связности на каждой компоненте запускается алгоритм Брона-Кербоша для выделения клик. Каждая максимальная по включению клика сохраняется в БД.

### **Выделение подозрительных коллективов**

Для оценивания степени подозрительности клик введены коэффициенты внутреннего и внешнего цитирования. Для их подсчета определим работу клики как работу, хотя бы один из авторов которой состоит в данной клике, внутреннюю ссылку клики как ссылку из одной работы клики на другую, в внешнюю ссылку — как ссылку на работу клики от статьи, не принадлежащей клике. Коэффициент внутреннего цитирования высчитывается как отношение количества внутренних ссылок к квадрату размера клики. Коэффициент внешнего цитирования — это отношение внешних ссылок к количеству работ клики.

Коэффициент внешнего цитирования отражает интерес к работам клики от других ученых и является показателем, характеризующим клику с положительной стороны. Коэффициент внутреннего цитирования показывает, насколько часто авторы ссылаются друг на друга. Низкий коэффициент может говорить о том, что клика образовалась случайно, а высокий — о том, что авторы подозрительно часто ссылаются друг на друга.

Коэффициенты одной клики дают мало информации сами по себе, так как в разных областях науки среднее количество ссылок в работе и количество работ у автора различаются. Но, вычислив коэффициенты цитирования многих клик, можно сравнить между собой отношение коэффициента внешнего цитирования к внутреннему. Чем меньше этот показатель, тем более подозрительной является клика. Отсортировав клики по этому отношению, можно найти потенциально недобросовестные коллективы авторов, а затем по БД восстановить их список работ.

Был проведен анализ работ из области «Electrical engineering». Данные о наиболее подозрительных кликах можно представить в виде таблицы.

*Таблица 1*

№	ИД клики в БД	Размер	К-т внешнего цитирования / к-т внутреннего цитирования	К-т внешнего цитирования	К-т внутреннего цитирования
1	5187	4	0.00993	0.07692	7.75000
2	2917	4	0.01310	0.03030	2.31250
3	4130	4	0.02332	0.07143	3.06250
4	2903	6	0.02500	0.08333	3.33333
5	4133	7	0.02642	0.08571	3.24490

Повторное исследование можно провести на том же графе, но с дополнительным условием: в клику могут входить только соавторы. Количество клик и их коэффициенты изменятся, однако самые подозрительные коллективы можно выделить таким же образом.

### **Заключение**

В рамках данной работы был разработан метод представления массива библиографических данных в виде графа цитирований, а затем, посредством анализа графа, были выделены потенциально подозрительные коллективы авторов. Применение

этого метода позволит бороться с недобросовестной эксплуатацией наукометрии путем нахождения недобросовестных коллективов.

### Список литературы

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Bron%E2%80%93Kerbosch\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Bron%E2%80%93Kerbosch_algorithm)
2. [https://en.wikipedia.org/wiki/Clique\\_\(graph\\_theory\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Clique_(graph_theory))
3. Bron C., Kerbosh J., Algorithm 457: Finding all cliques of an undirected graph, Comm. of ACM, 16, p. 575—577.
4. Augustson, J.G., and Minker, J. An analysis of some graph theoretical cluster techniques, J. ACM 17 (1970), 571-588.
5. <https://dev.mysql.com/doc/>
6. [https://www.researchgate.net/publication/358814560\\_Deep\\_Graph\\_Learning\\_for\\_Anomalous\\_Citation\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/358814560_Deep_Graph_Learning_for_Anomalous_Citation_Detection)
7. Detection of Potential Citation Clubs in Bibliographic Networks, DOI: 10.1007/978-981-16-5348-3\_56

## АЛГОРИТМЫ КАРТОЧНЫХ ИГР С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИПТОГРАФИИ БЕЗ ОДНОСТОРОННИХ ФУНКЦИЙ

В.А. ЖУКОВ, Э.С. ПАХАРЕВСКАЯ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Многие общеизвестные криптографические алгоритмы, входящие в архитектуру криптостойкой вычислительной системы, имеют достаточно сложную реализацию. Это следует из требований к односторонним функциям, на которые опираются эти алгоритмы. В настоящем докладе будут рассмотрены решения, позволяющие избежать применение односторонних функций, обеспечив необходимый уровень секретности, на примере карточных игр.

*Ключевые слова:* криптография, односторонние функции, карточные игры.

### Введение

Множество проблем современной криптографии решается с помощью односторонних функций [1]. Один из ярких примеров их использования — это хеш-функции. Если длина значения односторонней функции постоянна при любом аргументе, то ее называют хеш-функцией. Односторонние функции являются центральным понятием криптографии, однако само существование этих функций до сих пор не доказано и зависит от сложных гипотез теорий сложности [2]. В данной работе предлагается рассмотреть некоторые криптографические протоколы и их применение в реализации карточных игр с учетом обеспечения честной игры. Используемые нами подходы были впервые предложены в [3].

Во всех протоколах подразумевается следующее:

Узлы или участники находятся в широкоэвещательной сети и соединены друг с другом, образуя кольцо, ребра которого представляют собой защищенные каналы связи — это необходимо для предотвращения перехвата данных (Рис. 1).

Каждый узел в точности выполняет свои поставленные в протоколах задачи.

Случаи, в которых игроки объединяются, не рассматриваются.

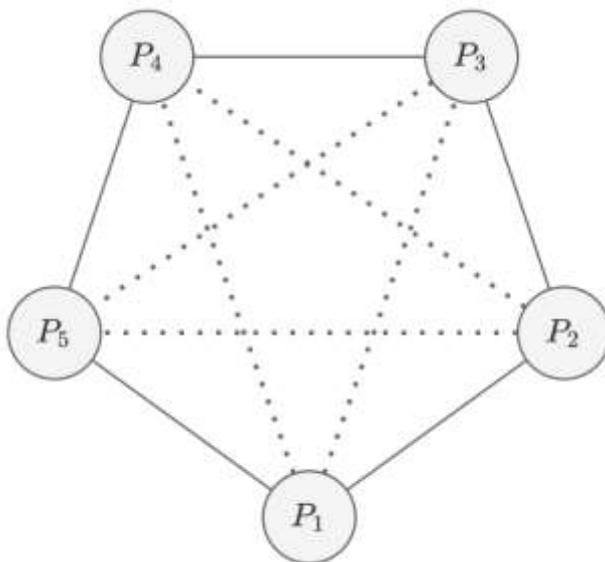


Рис. 1 Структура сети.

### **Вспомогательные протоколы**

Множество карточных игр включает в себя ряд элементарных операций, таких, как: перемешивание колоды, раздача, добор и выброс карт. Каждую такую операцию можно представить в виде отдельного протокола, который будет обеспечивать требуемый уровень секретности без применения односторонних функций. Полученные протоколы можно будет использовать для реализации карточных игр.

#### **1. Протоколы N0 и N1. Ментальный покер**

Первым протоколом будет «ментальный покер», состоящий из двух частей: N0 и N1. Первый предназначен для коллективного и секретного перемешивания карт; второй — для их раздачи игрокам. Предполагается также, что количество игроков больше трех [4].

#### **2. Протокол N2.1**

Для обеспечения секретности и удостоверения в том, что игрок играет честно, был использован протокол для генерации случайных чисел с помощью смежных участников. Этот протокол является усовершенствованной версией протокола, описанного в статье [3].

#### **3. Протокол N3**

Данный протокол предназначен для секретного добора карт из колоды. В его основе лежит протокол N0. В нем вводится термин свободные индексы — индексы в колоде, на которых расположены карты, которые игрок может взять в процессе игры. Свободные индексы появляются в результате выполнения протокола N0 при условии, что каждому игроку выдается число карт, большее минимально необходимого правилами игры.

### **Протоколы карточных игр**

Алгоритмы карточных игр состоят из более простых протоколов, описанных выше и также включают в себя шаги из правил конкретной игры.

#### **1. Взрывные котята**

Для построения протокола имели значение следующие детали правил: количество игроков от двух до пяти;

— колода состоит из 56 карт, среди которых 6 зеленых, 4 черных, а остальные — нейтральные;  
— игра происходит в открытую, то есть карты и действия игроков видны остальным. Поскольку правила игры не предполагают секретный добор карт из колоды, то в алгоритме были задействованы только протоколы N1 и N2.1.

## 2. Уно

Для построения протокола имели значение следующие детали правил:

- колода состоит из 108 карт, среди которых имеются дубликаты;
- карты на руках у игроков неизвестны остальным;
- выброшенные карты помещаются в колоду сброса, которую впоследствии можно смешать с колодой прикупа.

В алгоритме игры «Уно» используются протоколы N0, N1 и N3. В отличие от первой игры, в этой карты игроков скрыты от остальных, поэтому выполнение секретности необходимо — ее обеспечивают протоколы N1 и N3. По этой же причине нужны проверки на честность, а именно на то, что игрок выбросил действительно свою карту. Возможное решение этой проблемы заключается в сохранении действий игроков, происходящих на каждом этапе игры.

## Заключение

В работе рассмотрены примеры применения криптографии без односторонних функций в карточных играх с сохранением необходимого уровня секретности. Примерами послужили две игры: «Взрывные котятка» и «Уно». Обеспечение секретности и проверки на честность требуются только во второй игре, что было учтено в описанном протоколе. В будущем планируется обеспечить полностью секретный добор карт и разработать протокол секретного голосования с проверкой честности участников.

## Список литературы

1. Impagliazzo R., Luby M., One-way functions are essential for complexity based cryptography, 30th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1989, pp. 230-235, doi: 10.1109/SFCS.1989.63483.
2. Akavia A., Goldreich O., Goldwasser S., Moshkovitz D. On basing one-way functions on NP-hardness, Association for Computing Machinery, 2006, pp. 701-710, doi: 10.1145/1132516.1132614.
3. Grigoriev D., Shpilrain V. Secrecy without one-way functions, Groups Complex. Cryptol., 2013, pp. 1-18, doi: 10.48550/arXiv.1301.5069.
4. Barany, Z. Furedi, Mental poker with three or more players, Academic Press Professional Inc., 1983, pp. 83-93, doi: 10.1016/S0019-9958(83)80030-8.

## СИСТЕМА WISE TASKS GRAPHS

Д.Г. Зайков

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова*

**Аннотация.** В работе представлен учебный ресурс Wise Tasks Graphs, который позволяет создавать задачи по графам из различных модулей. Проиллюстрированы возможности представленной системы для различных целевых групп, таких как студенты, изучающие математику и алгоритмы, и создающие реализации системных модулей, студенты, которые используют ресурс для исследовательской деятельности, связанной с самостоятельной постановкой и решением задач, преподаватели, которые заинтересованы в создании

конструктивных задач по теории графов, а также в контроле работы студентов по ним студенты и школьники, изучающие теорию графов.

*Ключевые слова: графы, информационные технологии в образовании, дистанционное обучение, Java*

## Введение

Система Wise Tasks Graphs предназначена для создания и решения самопроверяемых задач по графам. Самопроверяемой задачей является такая задача, проверка решения которой происходит не через сверку с заранее сохраненным ответом, а через сверку с поставленным условием. Например, если задача стоит как «постройте граф, который является полным», то чтобы понять верно ли решена такая задача, системе требуется проверить граф-ответ на полноту, а не сверять с полными графами, которые хранятся в базе ответов.

Основная формулировка задач, которые можно поставить в рамках системы:

«Постройте граф с заданными свойствами...». Другая формулировка, для которой в системе есть механизмы проверки «укажите подграф данного графа, обладающего свойствами ...». Также допускаются и другие формулировки, связанные не только с выделением подграфа, но и присваиванием его элементам пометок различного вида, например порядка прохождения рёбер или вершин графа, весов рёбер, раскраски вершин или рёбер.

За различные свойства графа отвечают модули, которые описывают различные свойства графов и различные алгоритмы на графах. Комбинируя различные модули, можно создавать различные задачи. Такой подход позволяет быстро строить задачи достаточно широкого класса, так как для их создания требуется лишь комбинировать различные модули. Такая возможность обеспечивается пользовательским интерфейсом «учителя» (обратим внимание, что понятия «учитель» здесь условное, так как у самого студента или школьника есть возможность самому ставить задачи).

Для введения в задачу числовых характеристик, кроме проверки на равенство с заданным числом, можно использовать отношения больше и меньше, например «постройте граф, количество вершин в котором больше 5...».

## Пример задачи

Выберем модули, которые хотим добавить в задачу, а именно «полный граф» и «количество вершин».

Название задачи создается автоматически, но, при желании, его можно изменить.

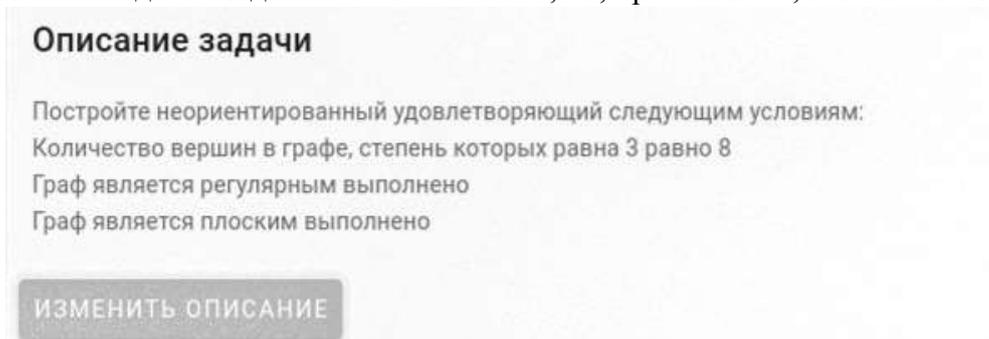


Рис 1, а. Описание задачи.

Верное решение задачи:



Рис 1, б. Верное решение задачи.

В решении допущена ошибка:

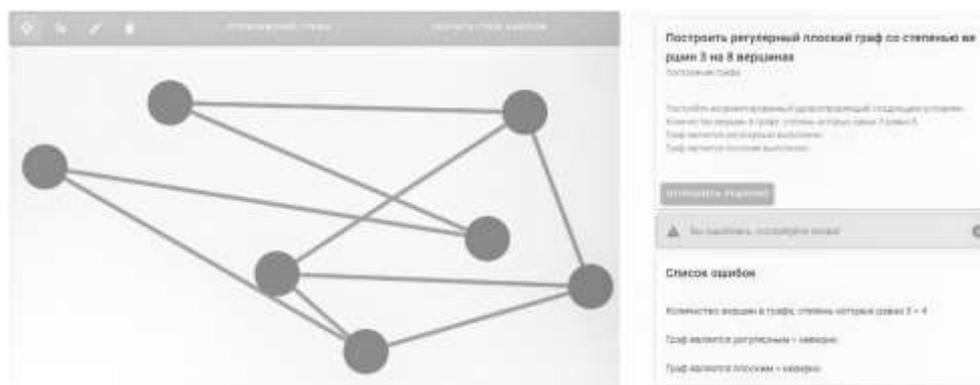


Рис 1, в. В решении допущена ошибка.

### Технические аспекты

Для работы с разными типами задач составитель устанавливает права для того, кто будет ее решать. Всего в системе доступно четыре вида прав — добавление элементов (ребер и вершин), установка цветов, удаление элементов и установка меток и весов для элементов. Для каждой задачи можно выбрать определенный набор прав (например, запретить удалять и добавлять элементы в графе, что может быть полезно в задачах, где требуется раскрасить уже имеющийся граф).

В качестве примера модулей приведем несколько свойств, являющихся в то же время названиями модулей системы (таблица 1). Выделим три вида свойств: бинарные свойства (обладает ли граф указанными свойствами), числовые характеристики и свойства выделенных, некоторым образом, подграфов подграфов.

Система предполагает три основных типа пользователей:

- Разработчик — пользователь, который реализует новые модули в системе, тем самым увеличивает число возможных для составления задач
- Учитель — пользователь, который используя модули создает задачи
- Ученик — пользователь, который решает эти задачи

**Примеры модулей**

<b>Бинарные свойства</b>	<b>Числовые характеристики</b>	<b>Выделенные подграфы</b>
Построенный граф является графом транзитивного отношения	Сумма степеней вершин неориентированного графа	Помеченные натуральными числами рёбра неориентированного графа образуют эйлеров путь (обход в порядке возрастания пометок)
Построенный неориентированный граф является эйлеровым	Найти кликовое число $\phi$ (плотность) неориентированного графа (число вершин в наибольшей клике)	Отмеченное подмножество вершин неориентированного графа является максимальным независимым
В построенном неориентированном графе есть доминирующая вершина	Найти число вершинной связности $\kappa$ (число связности) неориентированного графа	Отмеченный натуральными числами порядок обхода рёбер неориентированного графа является обходом в глубину (обход в порядке возрастания пометок)

Так как система является открытым веб-ресурсом, то любой человек может быть и учеником, и учителем, и разработчиком, то есть, любой желающий, используя веб-интерфейс может, как создавать модули, так и участвовать в наполнении задачника по графам, составляя новые задачи, а также может решать задачи, которые были составлены другими пользователями.

**Педагогические аспекты**

Система «Wise Tasks Graphs» уже была применена на практике среди студентов 2-го курса. Было составлено 100 заданий на составление модулей (так как система написана на языке Java, то и модули должны были быть написаны на нем). Учебный поток в 100 человек был разделен на команды, в каждой команде был капитан (человек, отвечающий за корректность реализации и тестирование модулей в команде).

Каждому студенту предлагалось выбрать и написать один модуль. При написании модуля студент учился применять изученные на лекциях алгоритмы на практике, что является хорошим способом закрепления знаний по курсу «Комбинаторика и теория графов». Также написание модулей предоставляло студентам возможность познакомиться с новым для студентов языком программирования Java.

**Выводы**

- Система Wise Tasks Graphs обеспечивает проверку задач по теории графов без ввода ответов на поставленные задачи.
- Система Wise Tasks Graphs обеспечивает условия для учебно-исследовательской работы по курсу теории графов: студент может ставить и решать задачи самостоятельно.

- Система Wise Tasks Graphs допускает распределенное наполнение не только задачами, но и инструментальными модулями, описывающими свойства графов и алгоритмы на графах.
- Основная проблема в наполнении системы Wise Tasks Graphs — добавление новых модулей, так как ошибки в реализованных алгоритмах повлекут неправильные реакции системы на составленные в ней задачи. В то же время, добавление новых модулей осуществляется гораздо реже, чем добавление новых задач, поэтому обеспечение корректной работы системы требует только поддержки системы модулей, но не системы задач.

Разработка систем, подобных Wise Tasks Graphs допускает организацию новых форм проектной работы студентов. Так в процессе наполнения системы модулями была организована распределенная работа студентов второго курса СПбГЭТУ «ЛЭТИ», которые изучали курс теории графов и добавляли написанные на языке Java реализации алгоритмов на графах в систему.

### Список литературы

1. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов: Наука / Гл. ред. физ-мат. лит., 1990. — 384 с.
2. Вороненко А. А., Федорова В. С. Дискретная математика. Задачи и упражнения с решениями: Учебно-методическое пособие. — М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова (лицензия ИД №05899 от 24.09.2001 г.); МАКС Пресс, 2012. — 103 с.
3. Поздняков С.Н., Толкачева Е.А., Зайков Д.Г., Чухнов А.С. Технологии продуктивного обучения в создании и использовании ресурсов типа Wise Tasks.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ШТЕЙНЕРА

М.А. КРИВОКОНЬ, А.А. АРТАМОНОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Задача Штейнера — это задача о минимальном дереве Штейнера, т.е. сети, соединяющей заданный конечный набор точек. Все существующие алгоритмы дают неэффективное решение, так как задача NP-полная. В этой работе мы исследуем два алгоритма с разными подходами: эвристический алгоритм, основанный на физических аналогиях и генетический алгоритм. Планируется программно реализовать эти алгоритмы и сравнить их эффективность с помощью вычислительных экспериментов.

### Введение

Задача Штейнера — это задача о минимальном дереве Штейнера, т.е. сети, соединяющей заданный конечный набор точек. Данная задача отличается от прочих тем, что в граф разрешается вносить дополнительные точки, называемые точками Штейнера, благодаря чему удается добиться лучшего результата, чем при использовании, например, алгоритма Краскала для построения минимального дерева. Одна из основных проблем в задаче Штейнера — это выбор местоположения этих дополнительных точек для получения наилучшего результата. Эффективного алгоритма для общего случая решения этой задачи нет, а все существующие дают лишь приближенное решение.

Нами были рассмотрены два подхода к решению данной задачи: эвристический алгоритм, основанный на физических аналогиях [1], и генетический алгоритм [2].

Для начала стоит привести несколько известных свойств деревьев Штейнера, на которых основаны алгоритмы:

- угол между любыми двумя ребрами в дереве Штейнера  $\geq 120^\circ$ .
- ни одна вершина в дереве Штейнера не может быть инцидентна более чем 3 ребрам.
- количество точек Штейнера  $s \leq n - 2$ , где  $n$  — количество вершин.
- все точки Штейнера лежат в выпуклой оболочке, образованной вершинами.
- каждая точка Штейнера соединена ребром как минимум с одной вершиной.
- полученное дерево Штейнера для 3 точек всегда будет локально минимально, но в общем случае дерево, составленное из локально минимальных, минимальным не будет.

### **Эвристический алгоритм, основанный на физических аналогиях**

Основная идея данного алгоритма — это представление вершин как материальных точек, то есть точек, обладающих массой. При рассмотрении 3 материальных точек, мы можем выбрать начальные координаты точек Штейнера, исходя из уравнения центра масс, которая выглядит следующим образом:

$$x_s = \frac{Mx_1 + Mx_2 + Mx_3}{3M}, y_s = \frac{My_1 + My_2 + My_3}{3M}, \quad (1)$$

где  $(x_s, y_s)$  — координаты полученной точки,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  — координаты вершин, а  $M$  — масса. Точка, посчитанная по этой формуле, гарантированно попадет внутрь треугольника, образуемого материальными точками.

Чтобы решить эту задачу для большего числа точек, следует рассмотреть все треугольники. В этом алгоритме для разделения всех точек на треугольники применяется триангуляция Делоне [3], а затем вычисляются координаты всех точек Штейнера, лежащих внутри каждого треугольника по формулам (1). То есть на этом шаге алгоритма количество точек Штейнера равняется количеству треугольников в триангуляции. Если же треугольников больше, чем  $n-2$ , то точки Штейнера удаляются случайным образом, пока не будет выполнено свойство 3 из введения.

Далее следует итерационная процедура пересчета координат точек Штейнера, то есть их оптимизация, что приводит к минимизации общей длины дерева. Для этого каждой точке Штейнера приписывается масса, которая меньше массы фиксированных точек. После чего происходит проверка некоторых условий и пересчет координат точек Штейнера по физическим формулам.

Когда пересчет координат всех точек Штейнера закончен, на выходе мы получаем множество вершин  $H = Q \cup S$ , где  $Q$  — множество изначальных точек,  $S$  — множество точек Штейнера. Множество вершин  $H$  можно попарно соединить ребрами, которые имеют вес, равный евклидову расстоянию, определив тем самым граф  $G$ . Минимальное дерево Штейнера можно получить, применив к графу  $G$  алгоритм Краскала. Если же полученный граф будет содержать точки Штейнера смежные более чем с 3 вершинами, будет применяться следующая процедура к множеству  $S$ :

Подсчитывается количество смежных вершин.

Если смежных вершин больше 3, то вершина удаляется.

С помощью алгоритма Краскала строится новое дерево.

### **Генетический алгоритм**

Данный метод решения задачи схож на первых шагах с предыдущим и различается лишь тем, что оптимизация точек Штейнера и построение дерева происходят по генетическому алгоритму. Так, на первом шаге, применяется триангуляция Делоне и вычисляются точки Штейнера в полученных треугольниках. Если треугольников больше, чем  $n-2$ , то как и в предыдущем алгоритме мы добиваемся выполнения условия 3 путем случайного удаления лишних точек. Полученное множество вершин  $H = Q \cup S$ , где  $Q$  — множество изначальных точек,  $S$  — множество точек Штейнера, мы попарно соединяем ребрами, имеющими свой вес, равный евклидову расстоянию так, чтобы выполнялось условие 2. Далее начинает работу сам генетический алгоритм.

Для начала стоит определить функцию приспособленности, которая будет считаться как  $Fitness[i] = cost[i]$ , где  $cost[i]$  — это сумма весов ребер  $i$ -ого графа потомка [4]. Наша задача состоит в том, чтобы минимизировать функцию приспособленности, чего можно добиться путем уменьшения  $cost$ , то есть уменьшением расстояния дерева Штейнера, либо удалением ребер в графе.

Алгоритм будет создавать различное количество популяция с разными генами. В роли генов будет выступать набор ребер и координаты точек Штейнера, где каждое ребро будет кодироваться 0 или 1. 0 — если ребро отсутствует, 1 — если присутствует. Затем с некоторой вероятностью происходят мутации и скрещивания генов. Следующему поколению передаются лучшие гены, то есть гены, имеющие наименьшую функцию приспособленности. Процесс эволюции происходит по эпохам. На выходе мы получаем наилучший ген, который дает нам лучшее итоговое расстояние дерева Штейнера.

Так как шанс мутации, количество популяций, количество эпох и многие другие параметры эволюции задаются вручную, то их изменение влияет на результаты.

### **Сравнение двух алгоритмов**

В данном исследовании мы планируем сравнить два рассмотренных выше алгоритма на разных входных данных. Предполагается сравнить их работу на малых и больших объемах данных, измерить время работы и эффективность. За эффективность алгоритмов мы будем считать полученное расстояние дерева Штейнера.

Для начала мы планируем взять граф, состоящий из 4 вершин, образующих квадрат, и получить для него решения обоими алгоритмами. Такой граф будет являться эталонным, так как решение для квадрата будет всегда оптимальным. Это позволит получить начальные данные для исследований и уже на этом шаге оценить, насколько сильно различается время работы алгоритмов.

Мы планируем постепенно повышать количество вершин и наблюдать как будет меняться эффективность алгоритмов и их время работы. Также планируем сравнить алгоритмы на графах, образующих сложные геометрические фигуры.

Предполагается, что для разных графов, а также объемов обрабатываемых данных потребуется подбирать параметры алгоритмов, в особенности генетического. Это позволит узнать, насколько сильно те или иные параметры влияют на итоговый результат для разных входных данных.

Также мы считаем, что эвристический алгоритм должен работать намного быстрее генетического, но менее точно. Это связано с тем, что генетический алгоритм содержит довольно много итераций и различных параметров, выставяемых вручную,

что существенно нагружает систему, особенно для больших входных данных. В связи с этим, при малом количестве точек, целесообразно использовать именно эвристический алгоритм. Однако, чтобы сказать это наверняка, необходимо понять, как сильно различаются результаты работы этих двух алгоритмов для различных данных.

Генетический алгоритм, в свою очередь, должен показывать лучший результат, чем эвристический, так как модель эволюции можно более тщательно настроить, однако за этим последует увеличение ресурсоемкости.

По мере исследований планируется записывать данные времени работы и эффективности алгоритмов, а также выбранные параметры. На основе этого, возможно, получится установить некую зависимость между параметрами алгоритма, количеством вершин и эффективностью работы алгоритмов. Это позволит сделать вывод о том, в каких случаях целесообразно их применять.

### Список литературы

1. Лисин А.В., Файзуллин Р.Т. Эвристический алгоритм поиска приближённого решения задачи Штейнера, основанный на физических аналогиях. Компьютерная оптика. 2013. — С. 503–510.
2. Кукин В.Д. Поточковая задача Штейнера. Эволюционный подход. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. — 59 с.: табл. 4, ил. 23.
3. Триангуляция Делоне [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. — Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Триангуляция\\_Делоне](https://ru.wikipedia.org/wiki/Триангуляция_Делоне)
4. Kapsalis A., Raywad-Smith V., Smith G.D. Solving the graphical steiner tree problem using genetic algorithms //Journal of the Operational Research Society. 1993. С. 397–406.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ АЛГОРИТМА RSK

А.Д. Кузьмин

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Алгоритм Робинсона-Шенстеда-Кнута (RSK) преобразует перестановку в пару таблиц Юнга одинаковой формы. Исследовались три реализации алгоритма RSK: линейный, бинарный, поиск с удвоением (doubling search). С помощью численных экспериментов для каждой реализации вычислялось необходимое число сравнений для построения таблицы  $P$ . Рассматривались как случайные планшерелевские таблицы, так и таблицы с заданным лесом выталкиваний. Установлено, что при построении таблиц Юнга, распределённых по мере Планшереля (строящихся по равномерно распределённым перестановкам) линейный подход показывает наилучший результат. Также рассмотрен вид таблиц, для которых наилучший результат показывает поиск с удвоением.

**Ключевые слова:** Таблица Юнга, алгоритм RSK, асимптотическая комбинаторика, мера Планшереля

— Преобразование Робинсона-Шенстеда-Кнута (RSK) представляет собой биекцию между набором перестановок и набором пар стандартных таблиц Юнга одинаковой формы: записывающей  $P$  и нумерующей  $Q$  [1]. Таблицы, получаемые при преобразовании равномерно распределённых случайных перестановок, имеют т.н. планшерелевское распределение [2].

— При стандартном преобразовании RSK очередное значение последовательности записывается в первый столбец таблицы  $P$ . Если это значение наибольшее в столбце,

то оно помещается в новую клетку сверху столбца. Иначе оно записывается на место ближайшего большего числа, которое в свою очередь «выталкивается» в соседний столбец справа. Вытолкнутое значение занимает позицию в следующем столбце по тому же принципу. Данный процесс завершается, когда очередное вытолкнутое значение окажется максимальным в столбце. Затем в таблицу  $Q$  помещается порядковый номер элемента последовательности в ячейку, в которой изменилась форма таблицы  $P$ . Алгоритм завершает работу после обработки всех элементов последовательности.

— Вычислительная сложность стандартного преобразования RSK в значительной степени состоит в поиске ближайшего большего значения в столбцах таблицы  $P$ . В связи с этим рассматривались различные подходы к поиску ближайшего большего: линейный, бинарный и поиск с удвоением (doubling search). При линейном поиске поиск ближайшего большего значения в столбце происходит сверху вниз, начиная от координаты предыдущего выталкивания, т.к. согласно свойствам таблицы Юнга, значения выше этой координаты всегда больше искомого. Бинарный поиск производится по каждому затронутому столбцу, где нижняя граница — начало столбца, верхняя — координата выталкивания в предыдущем столбце. Поиск с удвоением — подход, представленный Бентли и Яо [3], являющийся гибридом линейного и бинарного поисков.

— Проведена серия экспериментов по сравнению скорости различных подходов к реализации алгоритма RSK. Генерировались случайные перестановки натуральных чисел, состоящих из  $10^4, 10^5, 10^6, 10^7$  элементов. Затем, посредством применения описанных выше подходов, перестановки преобразовывались в пары таблиц Юнга. Для каждого алгоритма подсчитано среднее число сравнений, необходимых для обработки всех элементов перестановки.

С ростом размера таблиц растёт число операций, необходимых для обработки очередного значения входной последовательности. Это вызвано тем, что для каждого выталкиваемого значения необходимо искать в следующем столбце позицию ближайшего большего числа.

Таблица 1

**Среднее число сравнений при применении различных реализаций алгоритма RSK**

Длина перестановки	Число перестановок	Алгоритм		
		Линейный	Бинарный	Поиск с удвоением
$10^4$	$10^5$	$109 \cdot 10^3$	$309 \cdot 10^3$	$196 \cdot 10^3$
$10^5$	$10^4$	$335 \cdot 10^5$	$1209 \cdot 10^5$	$604 \cdot 10^5$
$10^6$	$10^3$	$1052 \cdot 10^6$	$4594 \cdot 10^6$	$1885 \cdot 10^6$
$10^7$	60	$3318 \cdot 10^7$	$17024 \cdot 10^7$	$5928 \cdot 10^7$

Согласно результатам таблицы 1, линейный алгоритм показывает наилучший результат при построении планшерелевских таблиц Юнга. Это связано со структурой планшерелевских таблиц, в соседних клетках которых, как правило, отсутствуют резкие перепады в значениях элементов. Также стоит отметить, что поиск с удвоением также

асимптотически эффективнее бинарного поиска, но медленнее линейного примерно в 1.79 раз.

Помимо распределённых по мере Планшереля рассматривался вид таблиц, в котором все пути выталкиваний [4] параллельны, т.е. для каждой клетки расстояние  $k$  до клетки с ближайшим большим значением в следующем столбце фиксировано. Генерировались таблицы с различной высотой первого столбца  $n$  и различным расстоянием (перепадом)  $k$ . Для каждой таблицы вычислялось среднее число сравнений для поиска ближайшего большего значения в каждом столбце. На рисунке 1 показано среднее число сравнений для таблиц различных размеров.

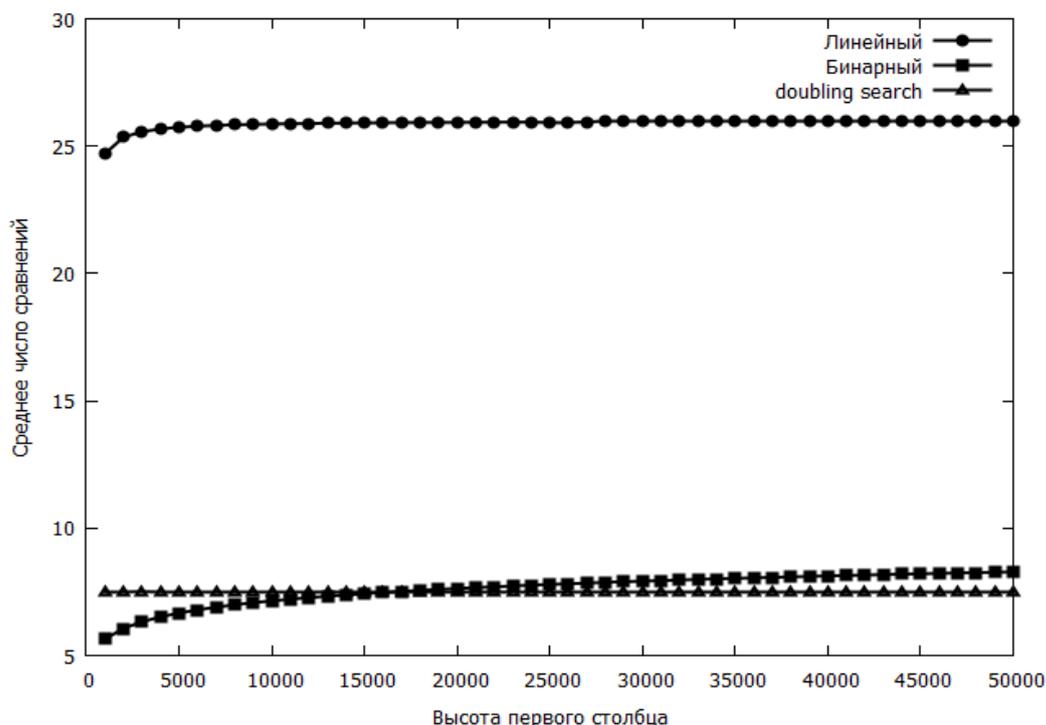


Рис. 1. Среднее число сравнений при добавлении элемента в таблицу Юнга с высотой первого столбца  $n = 1000$  до  $50000$ , перепадом  $k = 50$  для различных реализаций алгоритма RSK.

Согласно графику на рис. 1, линейный алгоритм значительно уступает другим подходам в таблицах с параллельными путями с фиксированной высотой перепада 50. Также, с ростом высоты первого столбца, происходит пересечение графиков бинарного и doubling search. Такое пересечение происходит только при значениях перепада  $k$ , значительно превышающих единицу. Также замечено, что при повышении значения  $k$  в  $i$  раз, точка пересечения бинарного и поиска с удвоением смещается примерно в  $i^2$  раз.

### Список литературы

1. Donald E. Knuth Permutations, matrices, and generalized Young tableaux. Pacific J. Math., 1970, vol. 34, iss. 3, — pp. 709-727.
2. Вершик А. М., Керов С. В. Асимптотика максимальной и типичной размерностей неприводимых представлений симметрической группы // Функциональный анализ и его приложения. 1985. Т. 19. № 1. — С. 25–36.
3. Jon Louis Bentley and Andrew Chi-Chih Yao. An almost optimal algorithm for unbounded searching. Information Processing Letters, 5(3):82–87, 1976.
4. Dan Romik, Piotr Śniady.: Limit shapes of bumping routes in the Robinson-Schensted correspondence. Available at: arXiv:1304.7589v2

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДЛИН ЦИКЛОВ ШЮТЦЕНБЕРЖЕ НАД ТАБЛИЦАМИ ЮНГА

А. МАКСИМОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Циклы случайных целочисленных перестановок являются предметом многочисленных исследований в области асимптотической комбинаторики. Работа посвящена исследованию распределения длин циклов Шютценберже на 2D, 3D и 4D таблицах Юнга. Была написана программа, реализующая алгоритм преобразования Шютценберже с сохранением формы. Был проведен ряд вычислительных экспериментов, в результате которых были получены распределения длин циклов диаграмм Юнга. Были построены графики усредненных длин циклов и вычислены отношения соседних длин циклов 2D, 3D и 4D диаграмм Юнга, а также диаграмм, обладающих максимальными размерностями. Отдельно были рассмотрены формы диаграмм Юнга с нетипичными распределениями длин циклов.

**Ключевые слова:** диаграммы Юнга, таблицы Юнга, преобразование Шютценберже, циклы перестановок, длины циклов.

Циклы случайных целочисленных перестановок являются предметом многочисленных исследований в области асимптотической комбинаторики. В том числе интерес вызывают вопросы, связанные со статистикой распределения длин циклов. Так, например, для случайных перестановок длины  $n$  известно математическое ожидание наиболее длинного цикла перестановки  $a_n$ , определяемое через константу Голомба  $\lambda$  [1], как  $a_n = n/\lambda$ .

На множестве таблиц Юнга фиксированной формы также может быть задана перестановка с помощью модификации преобразования Шютценберже [2] с сохранением формы. Однако распределение длин циклов этого преобразования ранее не изучалось, что делает актуальным данное исследование.

Настоящая работа является продолжением исследования распределения длин циклов четырехмерных диаграмм Юнга [3] на двумерный и трехмерный случаи. В рамках работы, в том числе, решались задачи реализации алгоритма 2D преобразования Шютценберже с сохранением формы [4], его обобщения на трехмерный случай, а также проведения вычислительных экспериментов для таблиц Юнга различных размеров с применением полного или частичного перебора. При этом под полным перебором подразумевается рассмотрение всего множества диаграмм Юнга заданного размера, под частичным — некоторого подмножества, полученного случайным образом.

В силу вычислительной сложности задачи, обоснованной факториальным ростом размерностей диаграмм при увеличении их размера, в работе накладывались ограничения на размеры рассматриваемых диаграмм: для 2D — от 10 до 20 клеток, 3D и 4D — от 10 до 16 клеток. Максимальная размерность исследуемых диаграмм не превышала значения  $134 \cdot 10^6$ .

В результате проведения экспериментов с помощью разработанной программы было сгенерировано 2499 двумерных, 7646 трехмерных и 27797 четырехмерных диаграмм. По полученным данным были построены усредненные графики распределения длин циклов 2D, 3D и 4D диаграмм Юнга, а также вычислены отношения соседних длин циклов. На рис. 1 (а) представлены соответствующие графики усредненных длин циклов

для двумерных диаграмм Юнга размера 10 и 20, на рис. 1 (б) — трехмерных диаграмм размера 10 и 16 клеток.

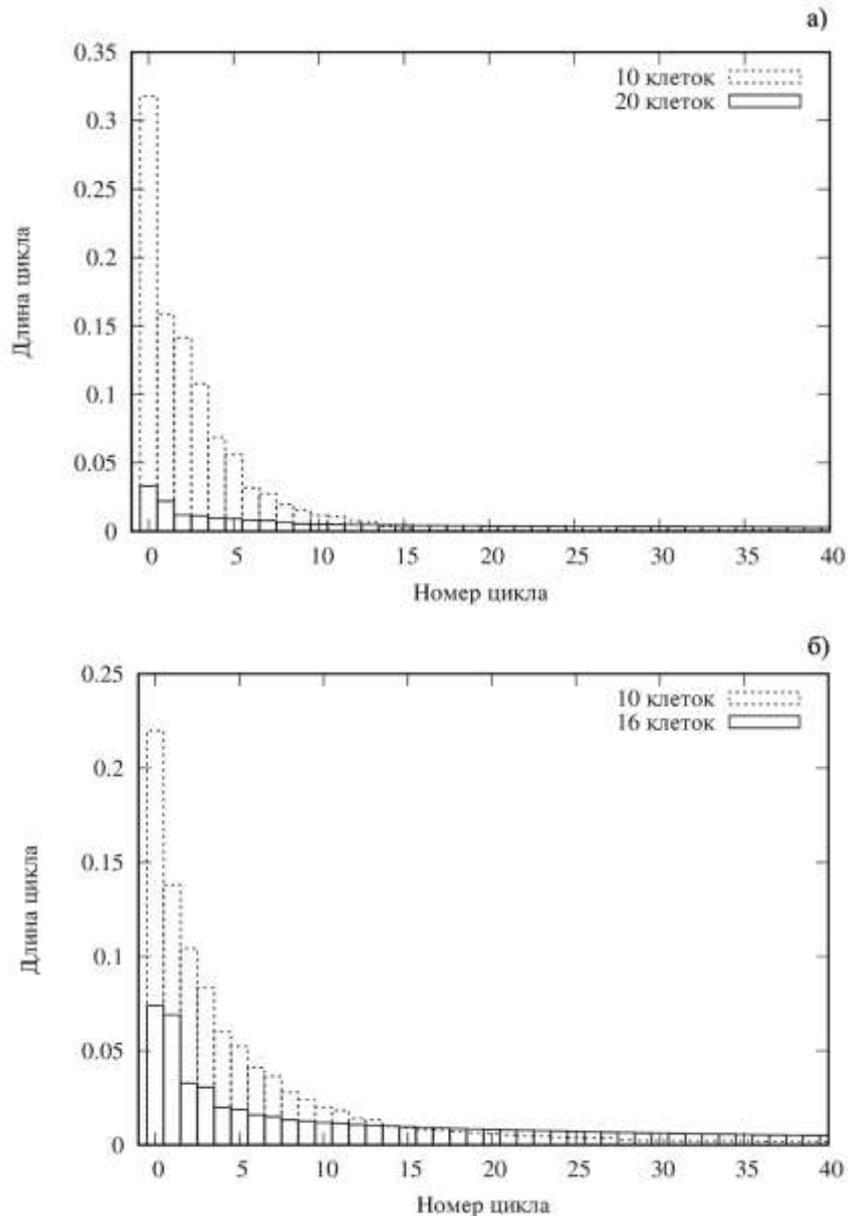


Рис. 1. Усредненные длины циклов 2D диаграмм Юнга размера 10 и 20 клеток (а), 3D диаграмм Юнга размера 10 и 16 клеток (б).

Как видно из рисунков 1 (а) и (б), структура длин циклов 2D и 3D диаграмм размера 10 неоднородна. Первый цикл существенно длиннее остальных и является доминирующим. При этом с увеличением размера двумерных диаграмм до 20 клеток и трехмерных до 16 клеток доля первого цикла уменьшается, перепады между длинами циклов сглаживаются, а циклы с относительно близкой длиной группируются попарно (1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 ...).

Отдельно, в качестве предельного случая, рассматривались диаграммы Юнга, обладающие максимальными размерностями. В таблице 1 представлены отношения длин

пар самых длинных циклов Шютценберже двумерных диаграмм Юнга  $\lambda_n$  размера  $n \in [10, 19]$  с максимальными размерностями  $\dim(\lambda_n)$ .

Таблица 1

**Отношения длин пар самых длинных циклов Шютценберже 2D диаграмм Юнга с максимальными размерностями**

n	$\dim(\lambda_n)$	Отношения длин циклов			
		1-ого и 2-ого	2-ого и 3-ого	3-ого и 4-ого	4-ого и 5-ого
10	768	1	1	1	1
11	2310	0.16	1	1	1
12	7700	1	0.48	1	0.914
13	21450	0.755	0.083	0.941	0.953
14	69498	0.926	0.993	0.994	0.975
15	292864	1	1	1	1
16	1153152	1	0.398	1	1
17	4873050	1	1	1	1
18	16336320	1	1	1	1
19	64664600	0.977	0.991	0.96	0.976

Как можно заметить из таблицы, даже при небольших размерах диаграмм первый цикл доминирует над остальными намного меньше (или не доминирует вовсе), чем у диаграмм, не обладающих максимальными размерностями. Также видно, что равные по значению длины циклов диаграмм с максимальными размерностями образуют уже не пары, а группы, состоящие из нескольких циклов.

Так как форма таблиц Юнга определяет структуру длин циклов, то дополнительно были рассмотрены формы диаграмм с нетипичными распределениями длин циклов, а именно диаграммы с минимальным и максимальным количеством циклов, а также с разбиением на циклы одинаковой длины.

К дальнейшим планам можно отнести вычисление математического ожидания количества циклов 2D, 3D и 4D диаграмм Юнга и распределения длин циклов строгих диаграмм Юнга. Также планируется исследовать, как асимптотически растет длина первого цикла Шютценберже при увеличении размерностей диаграмм Юнга.

**Список литературы**

1. Finch S. R. Mathematical constants. — Cambridge university press, 2003.
2. Schutzenberger M.P. Quelques remarques sur une construction de Schensted. — Math. Scandinavica 12, (1963), —с. 117-128.
3. Максимова А. Исследование структуры длин циклов в преобразовании Шютценберже над таблицами Юнга. / IX Научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, СПб, 13 — 15 мая 2021 г. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. — С. 18.
4. Duzhin V., Vassiliev N. «Randomized Schutzenberger's jeu de taquin and approximate ate calculation of co-transition probabilities of a central Markov process on the 3D Young graph», Representation theory, dynamical systems, combinatorial methods. Part XXXI, Zap. Nauchn. Sem. POMI, 285, St. Petersburg, 2019. — С. 90-106.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ РАЗМЕРНОСТЕЙ КОМПОНЕНТ ТРОПИЧЕСКИХ ПРЕДМНОГООБРАЗИЙ В ПАКЕТЕ GFAN

Ф. МИХАЙЛОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Тропическая математика является новой областью современной математики и имеет разнообразное приложение в алгебре, геометрии, computer science, биологии, экономике и инженерных науках. Одной из актуальных теоретических задач тропической математики является исследование размерностей компонент тропических предмногообразий, описываемых системой тропических соотношений. Как и некоторые другие задачи тропической математики, вычисления таких размерностей являются недостаточно исследованными с программной (вычислительной) точки зрения. В рамках этой работы производится обзор основных понятий тропической математики, а также осуществляется вычисление тропической энтропии в математическом пакете GFAN.

**Ключевые слова:** *тропическое предмногообразие, тропическая рекуррентная последовательность, тропическая энтропия, периодическая последовательность.*

### Введение

Тропическая математика — новый раздел математики, связанный с изучением полуколец и идемпотентным сложением, возникший в 2000-е годы. Несмотря на новизну, она уже нашла свои применения в алгебре, геометрии, математической физике, биологии [1], экономике [2], теории нейронных сетей, динамическом программировании, а также в других областях современной прикладной и теоретической математики.

Эта работа является продолжением работы [3]. В рамках этой работы для различных тропических рекуррентных соотношений были исследованы соответствующие тропические предмногообразия с помощью пакета GFAN с целью проверки гипотезы Григорьева о стабилизации максимальных размерностей компонент. Выполнение такой гипотезы позволяло бы вычислять размерности такой компоненты для рекуррентных последовательностей произвольной длины.

GFAN — это программный пакет для вычисления вееров Грёбнера и тропических многообразий, разработанный в 2005 году, А. Йенсенем, на основе алгоритмов в его диссертации [4]. Пакет GFAN позволяет вычислять базисы Грёбнера, вееры Грёбнера, тропические предмногообразия, многообразия по заданным многочленам и другие объекты тропической геометрии и теории базисов Грёбнера. В настоящий момент является самым мощным программным средством для таких вычислений. GFAN распространяется в качестве стандартного пакета Linux, входит в состав дистрибутива Debian.

### Постановка задачи

Основным объектом тропической математики является тропическое полукольцо  $(\mathbb{R} \cup \{+\infty\}, \oplus, \otimes)$ . Это множество состоит из вещественных чисел с дополнительным элементом — плюс бесконечностью. В тропическом полукольце классические операции сложения и умножения над вещественными числами заменяются на операции взятия минимума и классическое сложение соответственно:  $x \oplus y := \min(x, y)$ ,  $x \otimes y := x + y$ . В тропической математике есть свои аналоги полиномиальной алгебры, линейной алгебры и других разделов математики [5]. В том числе можно определить тропические

рекуррентные соотношения. Сначала определим классические рекуррентные последовательности.

Последовательность  $\{z_i\}_{i \in \mathbb{Z}}$  называется линейной рекуррентной последовательностью, удовлетворяющей вектору  $a = (a_0, \dots, a_n) \in R^{n+1}$ ,  $a_0 \neq 0$ ,  $a_n \neq 0$ , если для любого  $k \in \mathbb{Z}$  выполнено условие  $\sum_{0 \leq i < k} a_i z_{k+i} = 0$ . Важное свойство в классических рекуррентных последовательностях состоит в следующем: если вычислить все  $z$  до какого-то  $z_i$ , то так как последний коэффициент  $a_n$  не равен нулю, можно однозначно вычислить  $z_{i+1}$ , подставив в формулу соответствующие  $k$ . Так как такое свойство справедливо для любого  $i$ , то размерность решений рекуррентных последовательностей равна  $n$ , то есть зависит только от одного выбранного значения  $z_j$ .

Последовательность  $\{y_i \in R \cup \{\infty\}\}_{i \in \mathbb{Z}}$  называется тропической линейной рекуррентной последовательностью, удовлетворяющей вектору  $a = (a_0, \dots, a_n) \in (R \cup \{\infty\})^{n+1}$ ,  $a_0 < +\infty$ ,  $a_n < +\infty$ , если для любого  $k \in \mathbb{Z}$  выполнено условие  $\{a_i + y_{k+i}\}$ . Выполнение этого условия означает достижения минимума в двух или более тропических слагаемых  $a_i + y_{k+i}$ . В отличие от классических рекуррентных последовательностей, в тропических рекуррентных соотношениях каждый следующей член не всегда определён однозначно.

Тропические рекуррентные последовательности могут быть как периодическими, так и не периодическими для одного и того же вектора  $a = (a_0, \dots, a_n)$ . Последовательность  $\{y_i\}_{i \in \mathbb{Z}}$  называют периодической, если  $\exists d > 0$  такой, что последовательность  $\{y_i - d\}_{i \in \mathbb{Z}}$  является тропической рекуррентной последовательности для того же вектора  $a = (a_0, \dots, a_n)$ . Периодические рекуррентные последовательности в некотором смысле тривиальны, так как они соответствуют классическому рекуррентным последовательностям (каждый следующий элемент последовательности вычисляется однозначно). В данной работе нас интересуют непериодические тропические рекуррентные последовательности, для описания которых вводится понятие тропической энтропии.

Для определения тропической энтропии будем говорить о конечной тропической последовательности  $y = (y_0, \dots, y_s)$ , которая удовлетворяет  $a = (a_0, \dots, a_n)$ , описанным выше соотношением. Обозначим через  $D_s := D_s(a) \in R^s$  набор из всех конечных тропических последовательностей, удовлетворяющих вектору  $a$ , и  $d_s := \dim D_s$ . Тропической энтропией называют предел:  $H(a) := \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{d_s}{s}$ . Тропическая энтропия отображает наличие непериодических тропических рекуррентных последовательностей.

### Вычисление тропической энтропии

Поскольку тропическая энтропия является пределом, то в данной работе приводятся разумные гипотезы, чему она может быть равна. Для вычисления гипотетической тропической энтропии вектору  $a$  сопоставляется система  $n - s + 1$  линейных тропических уравнений с  $s + 1$  неизвестными, затем вычисляются тропические предмногообразия системы уравнений. Для вычисления тропических предмногообразий используется пакет GFAN. Пакет GFAN вычисляет тропические предмногообразия только для полиномов с нулевыми коэффициентами. Для ненулевых коэффициентов вводится параметризация, которая подробно разбирается в руководстве GFAN [6] при вычислении тропических кривых.

По вычисленному тропическому предмногообразию можно найти  $d_s$ . При серии вычислений с разным  $s$  можно обнаружить закономерность роста размерности и сделать вывод о гипотетической тропической энтропии.

С помощью линейных преобразований вектору  $a = (a_0, \dots, a_n)$  можно сопоставить вектор  $b = (0, b_1, \dots, b_{n-1}, 0)$ . Рассматривать случаи, в которых  $a_0 = 0$  и  $a_n = 0$  технически проще. Производя вычисления для вектора  $a = (a_0, a_1, a_2, a_3)$ , в которых рассматриваются случаи:

$a_1 = a_2 = a_0 = a_3 = 0$ , в котором гипотетическая  $H(a) = 1/2$ ;

$a_1 = a_2 = +\infty, a_0 = a_3 = 0$ , в котором гипотетическая  $H(a) = 0$ ;

$a_1 = +\infty, a_2 > 0, a_0 = a_3 = 0$ , в котором гипотетическая  $H(a) = 1/3$ ;

$a_1 = +\infty, a_2 = a_0 = a_3 = 0$ , в котором гипотетическая  $H(a) = 2/7$ ;

$a_1 = +\infty, a_2 < 0, a_0 = a_3 = 0$ , в котором гипотетическая  $H(a) = 1/4$ .

### Заключение

Производя вычисления тропической энтропии для изучения асимптотики  $d_s$  и поведения тропической энтропии при различных случаях вектора  $a$ , в том числе и для различных размерностей  $n$  вектора  $a$ , сделаны следующие выводы:

Не опровергнуто утверждение:  $0 \leq H \leq 1 - 1/n$ , которое предложено в [7].

$H(a) = 0$  только в двух случаях: если все рёбра являются ограниченными или при  $a_1 = a_2 = \dots = a_{n-1} = +\infty$ .

### Список литературы

1. Itenberg I., Mikhalkin G., Shustin E. Algebraic statistics for Computational Biology. — Cambridge: Cambridge University Press. 2005. — 447 с.
2. Baldwin E.A., Klemperer P.D. Tropical Geometry to Analyse Demand // Grantham Research Institute, Nuffield College. — 2014 — 83 с.
3. Михайлов Ф. Вычисление размерности компонент тропических предмногообразий, описываемых рекуррентными соотношениями // Сборник материалов конференции: IX Научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых», Санкт-Петербург, 13-15 мая 2021. Т. 2. — С. 24-26.
4. Jensen A.N. Algorithmic Aspects of Gröbner Fans and Tropical Varieties: докторская диссертация / Department of Mathematical Sciences, Aarhus. — 2007.
5. Maclagan D., Sturmfels B. Introduction to Tropical Geometry — Providence: American Mathematical Society. 2015. — 363 с.
6. Jensen A.N. Gfan version 0.6: A User's Manual — Mathematical Science. — 2017. — 19 июня — 68 с.
7. Григорьев Д.Ю. Tropical recurrent sequences. — CNRS, Mathématique, Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France. — 17 с.

## СЕКЦИЯ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРИКЛАДНЫХ ОБЛАСТЯХ

### ИНСТРУМЕНТ КАРТИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПО ДАННЫМ ФМРТ

В.И. АНДРЕЕВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной работе был выполнен рефакторинг реализации алгоритма картирования зон головного мозга по данным функциональной магнитно-резонансной томографии с целью улучшения производительности приложения, разработано web-приложение, с удобным интерфейсом для врача и визуализацией результатов исследований.

**Ключевые слова:** ФМРТ, обработка изображений, python, cuda.

#### **Введение**

При поступлении пациента в лечебное учреждение, у лечащего врача есть в распоряжении достаточно широкий спектр лабораторных и инструментальных методов исследования для диагностики заболевания. Ведущими неинвазивными или малоинвазивными высокотехнологичными методами исследования структур человеческого организма являются компьютерная и магнитно-резонансная томография (МРТ). Данные методы связаны с вычислительной техникой и цифровой обработкой сигналов.

В основном используются традиционные, так называемые, нативные методы исследования. Однако одной из задач работы врача с данными МРТ может быть и картирование функционально связанных областей мозга. Перед хирургическим вмешательством или во время исследований головного мозга, врачам необходимо представлять, где локализованы и как взаимодействуют между собой области мозга, выполняющие те или иные функции.

Функциональная МРТ помогает изучать работу головного мозга в целом, а также функциональные связи между его отделами [2]. Для визуализации функциональных зон по данным фМРТ можно использовать алгоритм normalized cut (NCUT) [1]. В статье рассмотрен метод [3], основанный на данном алгоритме, известна его реализация на Python 2 [5], к недостаткам следует отнести, что в данной реализации требуется чистая бинарная маска, которая в обычных условиях не всегда получается, из-за наличия шумов, отсутствует настройка параметров кластеризации. Отсутствует интерфейс для врача, что затрудняет его использование.

**Целью работы** является рефакторинг на Python 3 реализации алгоритма картирования зон головного мозга по данным функциональной магнитно-резонансной томографии с целью улучшения производительности и разработка web-приложения, с удобным интерфейсом для врача и визуализацией результатов исследований.

### Этапы картирования

Файлы из аппарата МРТ представляют собой сигналы, полученные в ответ на импульс, отправленный аппаратом. На выходе получается файл — трехмерная матрица (см. рис. 1), которую можно визуализировать как «анатомический» снимок мозга человека. Элементы матрицы называются вокселями и представляют собой срез ткани человека. Второй тип файлов 4-мерная матрица с функциональными снимками (фМРТ), которые получаются в более низком качестве, однако в ней можно наблюдать активность каждого вокселя (см. рис. 2). За активность принимается потребление кислорода в данной области мозга [4].

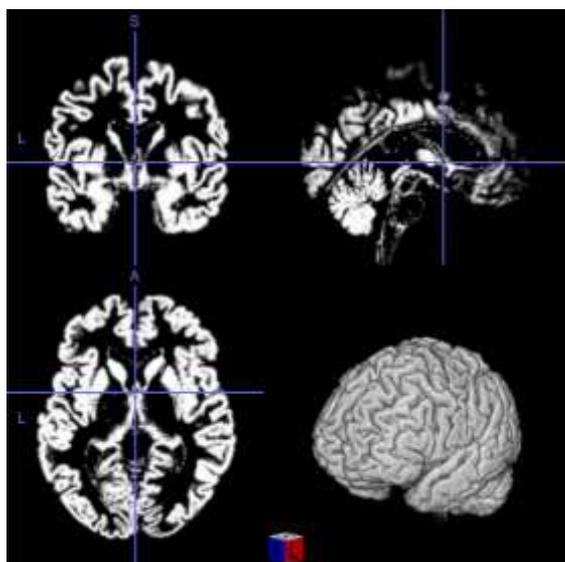


Рис. 6. Визуализация матрицы с мозгом человека.

Важным этапом анализа изображений является препроцессинг. Этот этап необходим перед кластеризацией. Одна из популярных программ для обработки данных функциональных снимков МРТ: CONN toolbox. Она позволяет проводить следующие этапы предобработки:

- Выравнивание изображений.
- Очистка от выбросов.
- Нормализация сигналов.
- Сглаживание.

Сегментирование тканей (костная, серое, белое вещество, спинномозговая жидкость).

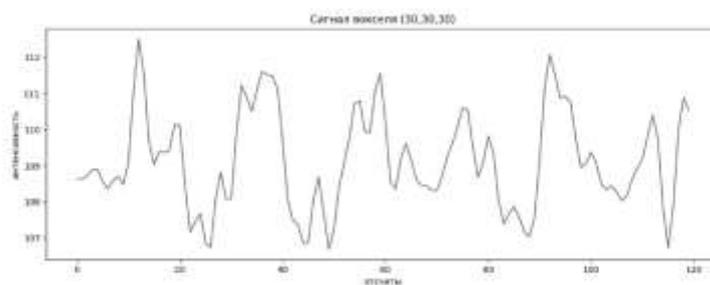


Рис. 7. График сигнала в заданном вокселе.

На выходе, из CONN, получаем функциональные данные и анатомические снимки серого вещества. Последний файл нужен для уменьшения размерности и выделения только интересующих функциональных вокселей, в которых есть вещество головного мозга.

После этого файлы обрабатываются рассматриваемым методом [3], который состоит из следующих шагов:

- Вычисление матрицы корреляции между вокселями.
- Кластеризация 1 уровня (для каждого пациента).
- Кластеризация 2 уровня (усреднение для всех пациентов).
- Сохранение результата.

### Результаты

В реализации [5] рассматриваемый метод можно использовать только с ручной настройкой программы. Пользователям необходимо разбираться в программировании, чтобы понять, как изменить параметры кластеризации. Поэтому в работе был выполнен рефакторинг реализации на Python 3, с использованием модулей, производящих вычисления на видеокарте, а не на процессоре, для этого вместо модуля numpy, используется библиотека машинного обучения torch. Результат работы алгоритма — файл, хранящий трехмерную матрицу — представление мозга, где цветовым кодом выделены кластеризованные области (см. рис. 3).

Для оценки эффективности результатов, введена величина — количество обработанных вокселей в секунду. Эта характеристика была вычислена для нескольких вариантов оптимизации (см. табл 1). Исходный результат — это оригинальный скрипт [5], запущенный в версии интерпретатора Python 2.7, совместимой с кодом. Следующее измерение — показатели после обновления кода до версии Python 3 и использования других библиотек. Последнее — запуск самых сложных, с математической точки зрения, функций на видеокарте компьютера.

Таблица 3

### Сравнение работы

Исходный результат, воксели/с.	Рефакторинг, воксели/с	Рефакторинг+GPU, воксели/с
14.62	16.23	18.89

Из таблицы можно сделать вывод, что рефакторинг улучшил производительность приложения. Не всегда в рабочей станции специалиста установлена видеокарта с поддержкой ядер CUDA, поэтому последний вариант стоит рассматривать опционально, если в медицинском центре имеется специальный сервер вычислений с видеокартой с поддержкой CUDA, на котором можно производить вычисления.

С позиции обычного пользователя, система должна быть удобной, а интерфейс понятным. Для удобства использования алгоритма, было разработано web-приложение (см. рис. 4), которое должно упростить взаимодействие с программой, настройку параметров кластеризации, а также вынести трудоёмкие вычислительные задачи с компьютера пользователя на специальный сервер, состоящий из двух компонентов: визуализации, в задачи которого входит работа с пользователем, и сервера вычислений, который производит обработку фМРТ снимков.

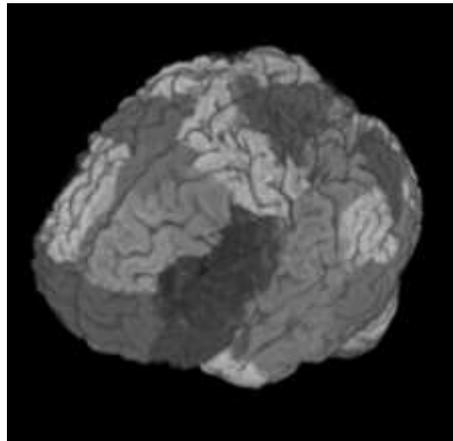


Рис. 8. Результат разбиения областей мозга на кластеры.

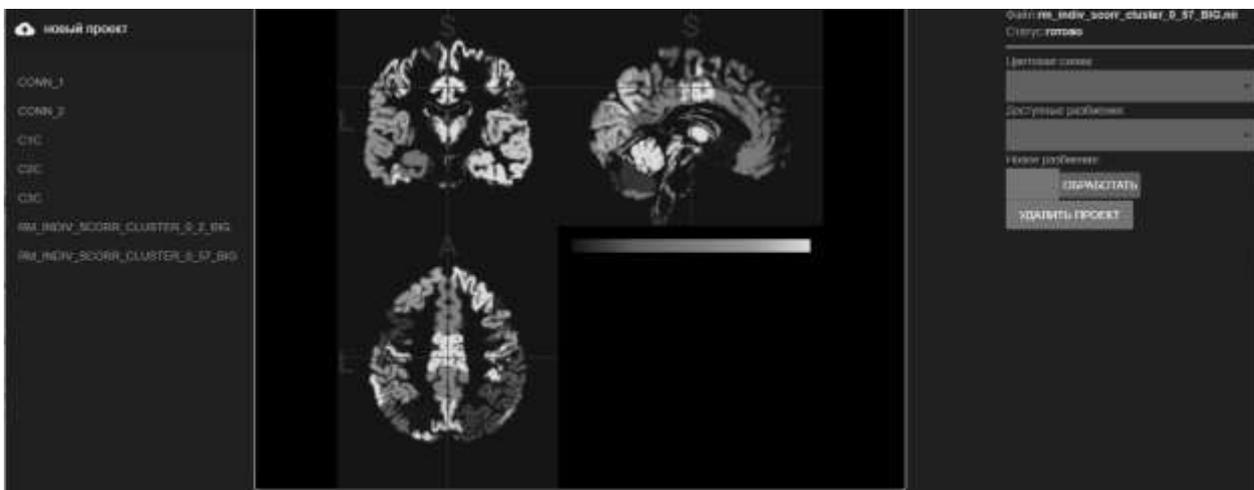


Рис. 9. Скриншот работы web-приложения.

## Заключение

Была проделана работа по рефакторингу существующего алгоритма кластеризации мозга на функциональные области. Удалось улучшить производительность за счёт использования современных возможностей языка Python. Для удобства и доступности использования предложенного метода, был реализован web-приложение.

## Список литературы

1. Jianbo Shi, J. M. Normalized Cuts and Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 888-905, 2000
2. Meenakshi Khosla, K. J. Machine learning in resting-state fMRI analysis. *Magnetic Resonance Imaging*, 101-121, 2019
3. Cameron R. Craddock, G. A. A whole brain fMRI atlas generated via spatially constrained spectral clustering. *Human Brain Mapping*, 1914-1928, 2011
4. Гейдж Н., Б. Б. Мозг, познание, разум. Введение в когнитивные нейронауки. Часть 1, 2. Москва: Лаборатория знаний, 2021
5. [github.com/ccraddock/cluster\\_roi](https://github.com/ccraddock/cluster_roi) [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/ccraddock/cluster\\_roi](https://github.com/ccraddock/cluster_roi) (дата обращения 29.04.2022)

## МОДУЛЬ ПОСТРОЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ ЗАПРОСОВ К ОНТОЛОГИЧЕСКИМ БАЗАМ ЗНАНИЙ

А.Э. СЛЕПОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В статье рассмотрены основы семантических технологий, их преимущества, способы извлечения знаний из семантической базы знаний Wikidata.

**Ключевые слова:** семантические технологии, базы знаний, SPARQL, Wikidata, Semantic Web, вопросно-ответные системы.

### Введение

Накопление и использование знаний являются важными задачами для устойчивого развития человечества. До появления компьютеров знания хранились в книгах, в современном мире для этого используются различные базы данных (чаще всего реляционные).

Концепция Semantic Web предлагает хранить знания в узлах семантической сети. Семантическая сеть представляет собой ориентированный граф, в узлах которого хранятся объекты предметной области, а дуги задают отношения между ними. Такая формализация предоставляет гибкую схему работу со знаниями и открывает большие возможности для машинной обработки (автоматического анализа и логического вывода) [1].

Semantic Web является развитием классического World Wide Web (WWW). Классический веб представляет собой распределенную систему доступа к гипертекстовым документам (веб-страницам), объединённых общей темой. Наглядной реализацией такого подхода к хранению информации является Википедия. В интернет-энциклопедии представлены веб-страницы о различных сущностях, в тексте которых встречаются ссылки на другие сущности. Такой подход к хранению информации удобен для восприятия человеком, но накладывает ограничения на машинную обработку информации.

### Извлечение знаний из World Wide Web

Машинная обработка информации возникает, когда человек обращается к поисковой системе (Google, Яндекс) с целью получить какое-то знание. Зададимся вопросом «Кто является президентом России?», обратимся за помощью к Яндекс и изучим содержание ответа поисковой системы (рис. 1).

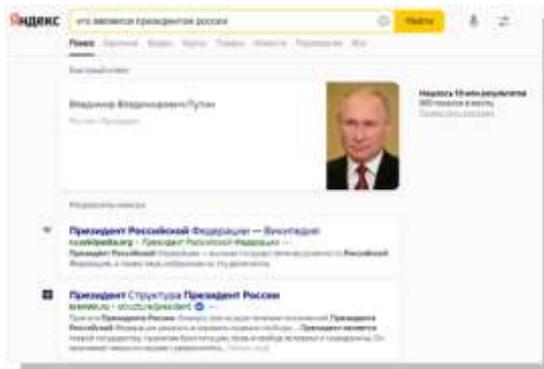


Рис. 1. Поисковый запрос «Кто является президентом России».

В блоке «Быстрый ответ» представлен в точности ответ на вопрос, который мы задали. Действительно, президентом России является человек по имени Владимир Владимирович Путин. Забегая вперед, следует отметить, что данный блок является следствием применения идей Semantic Web в современных поисковых системах.

В блоке «Результаты запроса» представлены ссылки на различные сайты: Wikipedia и официальное интернет-представительство президента России. Именно в этом месте раскрывается недостаток классического веба (причина развития идей Semantic Web). Поисковые системы не анализируют смысловую нагрузку запроса, а вычисляют релевантность веб-страницы (т.е. сколько раз встречается данное слово в данном гипертекстовом документе по отношению друг к другу).

### Основная идея Semantic Web

Средством хранения знаний в Semantic Web является ориентированный граф. Рассмотрим ту часть графа, которая может использоваться для ответа на поисковый запрос «Кто является президентом России?».

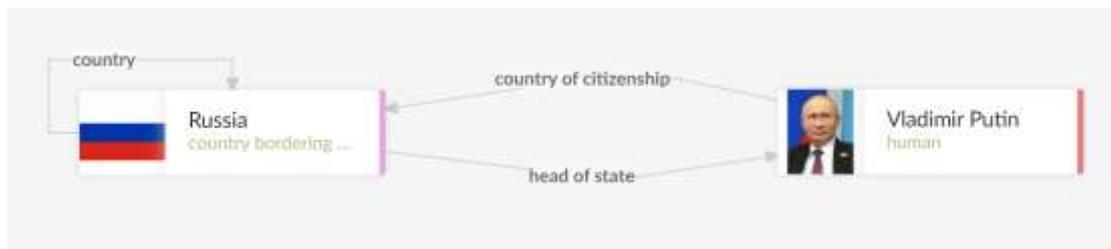


Рис. 2. Подграф для запроса «Кто является президентом России».

На рис. 2 представлено внутренняя структура открытой базы знаний Wikidata. Как отмечалось выше, знания хранятся в ориентированном графе. Вершинами этого графа являются объекты предметной области:

- Государство — Российская Федерация;
- Человек — Владимир Путин;
- Дуги представляют собой отношения между объектами предметной области. Например:
  - Главой/президентом (head of state) государства Российская Федерация является Владимир Путин
  - Местом работы (work location) Владимира Путина является город Москва.

Таким образом, для ответа на заданный вопрос поисковому агенту необходимо в базе знаний найти сущность «Российская Федерация» и перейти по дуге «head of state (глава/президент)». Вершина графа «Владимир Путин», в которой агент окажется, будет ответом на поисковый запрос. Очень важно, что поисковый агент полностью понял смысловую нагрузку вопроса и смог дать четкий ответ.

### Компоненты Semantic Web

Для реализации идей Semantic Web используется сложный стек языков и технологий, который называется Semantic Web Layer Cake (рис. 3). В настоящей работе наибольший интерес представляют блоки Abstract Language и Query.

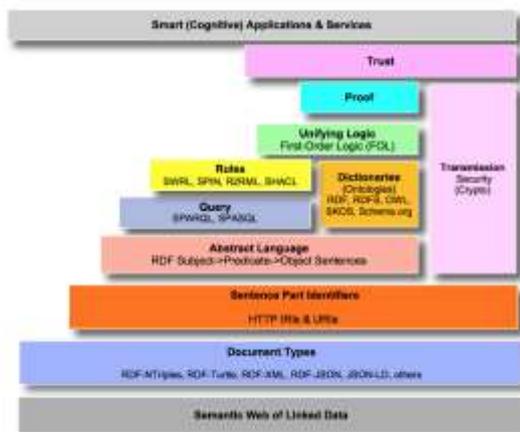


Рис. 3. Semantic Web Layer Cake.

Блок Abstract Language представляет аппарат для описания объектов предметной области и отношений между ними. Все знания описываются тройками (триплетами) вида «субъект-предикат-объект». Триплеты описываются с помощью модели RDF (Resource Description Framework [2]) и могут быть изображены на графе.

Таким образом, на рис. 2 изображено 9 триплетов. Триплет, который хранит знание о президенте России имеет следующий вид: «Россия — президент — Владимир Путин».

Для доступа к данным и извлечения знаний разработан специальный язык запросов SPARQL (Semantic Protocol and RDF Query Language). Он имеет некоторые синтаксические сходства с языком запросов к реляционным базам данных SQL, но работает с RDF триплетами [3].

Семантический запрос на языке SPARQL, отвечающий на вопрос «Кто президент России» представлен на рис. 4.



Рис. 4. Семантический запрос на языке SPARQL

Ключевое слово SELECT свидетельствует об извлечении факта из базы знаний. Сущности Россия соответствует «wd:Q159» (уникальный идентификатор России в Wikidata). Запрос извлекает сущность *president*, которая связана с Россией отношением «wdt:P35» (уникальный идентификатор отношения head of state в Wikidata). Результатом работы запроса является сущность «wd:Q7747», которая соответствует Владимиру Путину.

## Использование SPARQL-запросов для извлечения знаний из Wikidata

Использование Semantic Web и языка семантических запросов SPARQL открывает большие возможности для построения вопросно-ответных систем. Такие системы из вопроса пользователя составляют семантический SPARQL-запрос, который обращается к Wikidata. Семантический запрос полностью концентрируется на смысле вопроса и ищет ответ на него. Пример работы семантической вопросно-ответной системы представлен на рис. 5.

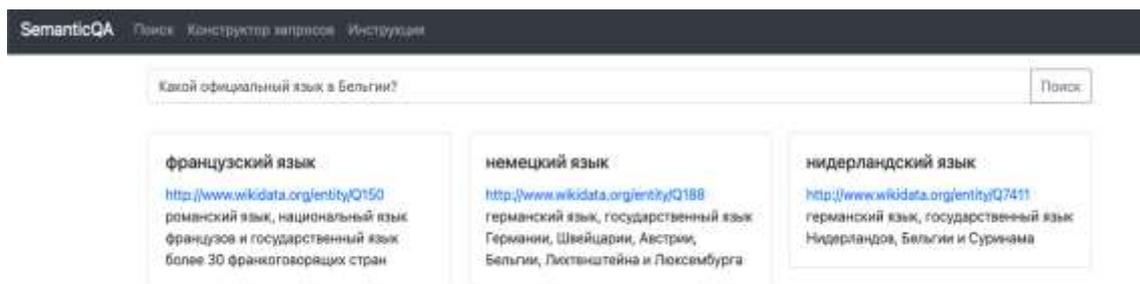


Рис. 5. Вопрос семантической вопросно-ответной системе

Так же вопросно-ответная система может предоставлять графический конструктор SPARQL-запросов. Эквивалентный рис. 5 запрос из конструктора запросов представлен на рис. 6.

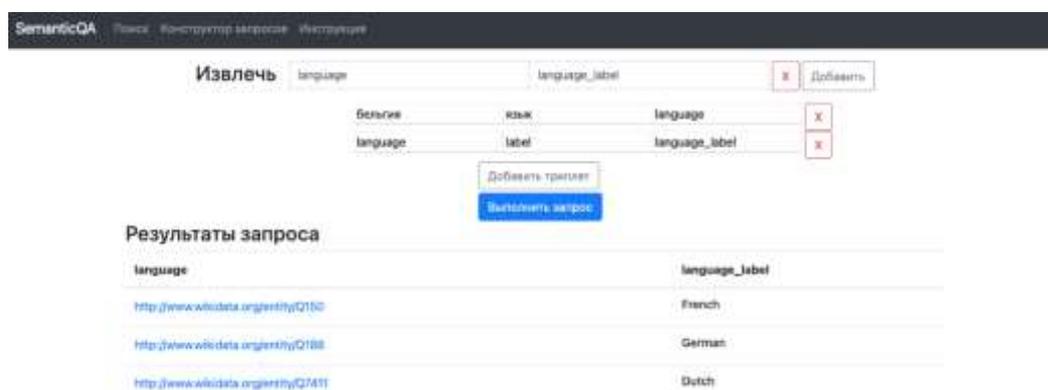


Рис. 6. Конструктор запросов в семантической вопросно-ответной системе

Преимуществом такого подхода к построению информационных систем, является независимость схемы данных от программной реализации. Все знания описаны в триплетях, поэтому программному агенту требуется только предложить удобный интерфейс пользователя и знать соответствие объектов естественного языка сущностям в конкретной базе знаний. Семантическая вопросно-ответная система, представленная на рисунках 5 и 6, посвящена тематике государств и географии. Тематика обеспечивается загружаемой в память программы словарь соответствия русских слов и Wikidata URI (Uniform Resource Identifier). Для смены предметной области или ее расширения нет необходимости переписывать логику программы, нужно только подменить или дополнить таблицу соответствий.

## Список литературы

1. Онтологическое моделирование предприятий: методы и технологии: монография; [отв. ред. Горшков С. В. ]; предисл. Горшкова С. В. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 236 с.

2. Toby Segaran, Colin Evans, Jamie Taylor. Programming the Semantic Web. — O'Reilly Media, 2009. — 302 с.
3. Wikidata [Электронный ресурс] SPARQL tutorial // URL: [https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:SPARQL\\_tutorial](https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:SPARQL_tutorial)

## ПОДДЕРЖАНИЕ БДИТЕЛЬНОСТИ ВОДИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПОМОЩЬЮ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

УВАРОВ К.А

*Санкт-петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Невнимательность при управлении транспортным средством зачастую приводит к дорожно-транспортным происшествиям. Одним из подходов к решению этой проблемы является использование автоматизированной системы, которая определяет состояние водителя и выполняет действия, направленные на поддержание концентрации его внимания. В этой статье рассматривается идея использования обучения с подкреплением для создания системы персонализированных воздействий на водителя. В работе предлагается концептуальная модель и общая постановка проблемы обучения с подкреплением. Также в ней описывается имитационная модель водителя, которая может быть использована для разработки политики персонализированных вмешательств. Экспериментальное исследование показывает, что предлагаемая постановка позволяет формировать персонализированные политики воздействий, которые могут быть использованы для эффективного поддержания желаемого состояния водителя транспортного средства.

**Ключевые слова:** обучение с подкреплением, DQN, персонализация.

### Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения более 1.3 миллиона человек ежегодно погибает в дорожно-транспортных происшествиях [1]. Одной из основных причин дорожно-транспортных происшествий является невнимательность, в том числе, вследствие усталости. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается концепция автоматизированной системы, которая осуществляет мониторинг состояния водителя и воздействует на водителя для повышения его концентрации на дорожной ситуации (например, с помощью световой индикации или звукового оповещения).

Каждый человек уникален и по-разному может реагировать на различные воздействия в той или иной ситуации. Реакция человека на воздействие зависит от многих параметров, которые относятся как к физиологическим параметрам, так и к когнитивным. По этой причине разработать систему, которая будет влиять на различных людей одинаково эффективно очень трудно. В таком случае следует двигаться в направлении персонализированных систем, которые индивидуально для каждого пользователя будут выбирать воздействие. Влияние на пользователя с помощью персонализированных политик — одно из перспективных направлений исследований. В частности, подобный подход находит применение в системах мобильного здравоохранения, обеспечивая формирование каких-либо полезных привычек. Перспективным способом формирования персонализированных стратегий влияния является обучение с подкреплением, которое может использоваться для адаптивной оптимизации стратегий вмешательства на основе

контекста пользователя. В рамках данной статьи рассматривается концепция системы персонализированных воздействий на водителя.

### Концептуальная модель решения

На рис. 1 показана концептуальная модель предлагаемого решения. Она состоит из нескольких основных компонентов: среды, системы мониторинга и агента.



Рис.1. Концептуальная модель предлагаемого решения.

Среда — это пространство, из которого агент получает данные и с которым он может взаимодействовать. Среда состоит из 2 участников — автомобиля и водителя. Высококачественный сбор данных, а также правильная интерпретация состояния окружающей среды являются очень важным моментом в системах мониторинга водителей.

Современные автомобили имеют на борту большое количество датчиков и микрокомпьютеров, которые подключены к одной общей внутренней сети. Эти датчики обмениваются большими потоками данных в режиме реального времени. Анализ этих данных позволит получить дополнительную информацию о стиле вождения водителя.

Как упоминалось ранее, большой процент дорожно-транспортных происшествий происходит по причинам, связанным с тем, что водитель находится в «неоптимальном» состоянии. Поэтому очень важно уметь обнаруживать это состояние. В случае вождения требуется отслеживать не только какие-либо физиологические особенности человека, но и анализировать его действия, куда направлен его взгляд и как двигаются его руки. Это важно, потому что человек может физиологически находиться в нормальном состоянии, т.е. быть бодрым, отдохнувшим, но он может отвлекаться на взаимодействие со смартфоном, информационно-мультимедийной системой или общение с пассажиром. Все эти отвлекающие факторы значительно увеличивают вероятность попадания в аварию. Поэтому для решения такой сложной задачи, как мониторинг водителя, используются различные технологии и решения. Существует несколько основных способов анализа поведения водителя: технологии компьютерного зрения; анализ данных с электроэнцефалограммы; анализ частоты сердечных сокращений.

Под агентом подразумевается программа, которая принимает решение об воздействии на основе состоянии среды, опыта и реакции на вмешательство, решает, какое действие следует применить в конкретной ситуации и следует ли его вообще предпринимать. В данной работе предлагается реализовать агента на основе обучения с подкреплением. Использование обучения с подкреплением позволяет создать очень гибкий алгоритм, который будет взаимодействовать с пользователем «точечно», применяя к нему именно те воздействия, на которые пользователь будет лучше реагировать. Этот механизм реализован на основе обратной связи в виде вознаграждения, которое агент получает после взаимодействия с водителем. Стратегия расчета вознаграждения является очень важным компонентом и требует отдельного изучения.

### **Постановка задачи обучения с подкреплением**

Задача мониторинга водителя и разработки предупреждений или рекомендаций может быть сведена к задаче формирования оптимальной политики воздействия на водителя предупреждениями или рекомендациями. Разработка способов формирования оптимальной политики воздействия на какой-либо объект на основе опыта последствий этих воздействий является основным предметом обучения с подкреплением. Рассмотрим задачу предоставления персональных воздействий на водителя для поддержки «нормального» состояния в качестве задачи обучения с подкреплением.

- Среда — это водитель, состояние которого определяется различными физиологическими и когнитивными параметрами, которыми он обладает в определенный момент времени.
- Агент — это система выдачи персональных рекомендаций.
- Наблюдения — это параметры, которые агент наблюдает из всех параметров состояния среды.
- Действия — это список различных вмешательств, которые могут повлиять на бдительность водителя. Такими вмешательствами могут быть звуки разной громкости и высоты или световая индикация.
- Вознаграждение — это разница между состоянием после воздействия и до воздействия. Таким образом, агент получает информацию о том, какие эффекты наиболее эффективны для данного конкретного человека.

### **Описание эксперимента**

Моделирование состояния человека является очень сложной задачей. На данный момент не существует адекватных моделей, которые позволяют не только моделировать состояние усталости или состояние бдительности, а также моделировать реакцию на взаимодействие с человеком. По этой причине в рамках работы была создана своя модель усталости человека, основанная на трёхпроцессной модели бдительности человека [2]. Трёхпроцессная модель бдительности позволяет по расписанию сна и бодрости человека смоделировать значение его бдительности в зависимости от времени. К оригинальной трёхпроцессной модели был добавлен механизм реакции на вмешательство, а также механизм привыкания к вмешательствам. Рассмотрим добавленные механизмы. Величина, на которую увеличивается бдительность при вмешательстве рассчитывается по формуле:

$$IncAlert = CurrAlert * StimulationCoef,$$

где *CurrAlert* — значение текущей бдительности, *StimulationCoef* — это значение основанное на механизме привыкания и рассчитывается по формуле:

$$StimulationCoef = \frac{(1 - HabitValue) * IntensityAct}{100},$$

где *IntensityAct* — это значение интенсивности, которое определено для каждого действия.

$$HabitValue = e^{-(CurrTime - PrevTime) / (7.5 * 1.2^N)},$$

где *CurrTime* — текущее время в минутах, *PrevTime* — время предыдущего взаимодействия, *N* — количество взаимодействий данного типа, которые уже были совершены в течении суток. Если это первое взаимодействие определенного типа, то *HabitValue* равно 0.

Для решения данной задачи был использован алгоритм DQN [3], который показал хорошие результаты при решении различных задач. В рамках эксперимента мы сравнивали стратегию, найденную разработанным агентом на базе DQN, со случайной стратегией, в рамках которой действие агента выбирается случайно. На рис. 2 показано сравнение уровней бдительности обученного агента, случайной политики и начального значения бдительности. Политика, которую изучил разработанный агент, имеет преимущество перед случайной политикой. Таким образом, взаимодействие с пользователем на основе политики обученного агента может быть более эффективным в ситуации поддержания водителя в нормальном состоянии.

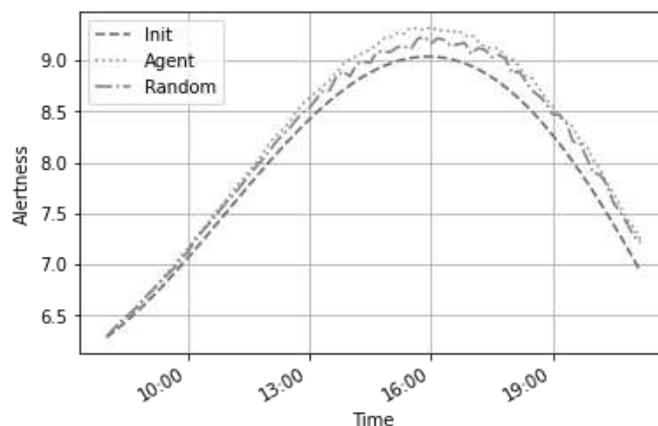


Рис.2. Сравнение уровней бдительности.

## Заключение

В статье предложена концепция системы поддержки водителя, отличительной особенностью которой является формирование персонализированных воздействий на водителя с целью поддержания его в определенном состоянии. Для поиска политики персонализированных воздействий предложено использовать обучение с подкреплением. Эксперимент показал, что эффективная политика вмешательства может быть успешно реализована с помощью алгоритма обучения с подкреплением (DQN). Разработанная политика оказалась эффективней случайной политики, что подтверждает предположение о перспективности предлагаемого подхода. Дальнейшее развитие исследований в этом направлении связано с экспериментами с другими алгоритмами обучения с подкреплением и функциями назначения вознаграждения, а также с оценкой эффективности предложенного подхода в реальных условиях.

### Список литературы

1. World health organization, *Global status report on road safety 2018*, Switzerland. — 2018
2. Åkerstedt T. and Folkard S., The Three-Process Model of Alertness and Its Extension to Performance, Sleep Latency, and Sleep Length. *Chronobiology International*. vol.14 (2), Apr. 1997, — pp. 115–123.
3. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Graves A., Antonoglou I., Wierstra D., Riedmiller M. Playing Atari with Deep Reinforcement Learning, NIPS Deep Learning Workshop. — 2013.

Сборник материалов  
X Научно-практической конференции с международным участием  
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»  
для студентов, аспирантов и молодых ученых  
состоявшейся 19-21 мая 2022 г.  
в г.Санкт-Петербурге  
Том II