

с е т е в о й н а у ч н ы й ж у р н а л ISSN 2518-1092

НАУЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

R E S E A R C H R E S U L T

Том 4 | № 2
Volume 4 | 2019

НАУЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ.
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

RESEARCH RESULTS.
INFORMATION TECHNOLOGY

Сайт журнала:
rrinformation.ru

сетевой научный рецензируемый журнал
online scholarly peer-reviewed journal



Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл. № ФС77-69101 от 14 марта 2017 г.

The journal has been registered at the Federal service for supervision of communications information technology and mass media (Roskomnadzor)
Mass media registration certificate El. № FS 77-69101 of March 14, 2017



Том 4, № 2. 2019

СЕТЕВОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2016 г.

ISSN 2518-1092



Volume 4, № 2. 2019

ONLINE SCHOLARLY PEER-REVIEWED JOURNAL

First published online: 2016

ISSN 2518-1092

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: **Черноморец А.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ: **Болгова Е.В.**, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

РЕДАКТОР АНГЛИЙСКИХ ТЕКСТОВ СЕРИИ: **Ляшенко И.В.**, кандидат филологических наук, доцент

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Басов О.О., доктор технических наук (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург)

Белов С.П., доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Волчков В.П., доктор технических наук, профессор (Московский технический университет связи и информатики, г. Москва)

Дмитриенко В.Д., доктор технических наук, профессор (Харьковский национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина)

Иващук О.А., доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Корсунев Н.И., заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Коськин А.В., доктор технических наук, профессор (Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел)

Ломазов В.А., доктор физико-математических наук, профессор (Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, г. Белгород)

Маторин С.И., доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

Рубанов В.Г., заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород)

EDITORIAL TEAM:

EDITOR-IN-CHIEF: **Andrey A. Chernomorets**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University

EXECUTIVE SECRETARY: **Evgeniya V. Bolgova**, Senior Lecturer, Belgorod State National Research University

ENGLISH TEXT EDITOR: **Igor V. Lyashenko**, Ph.D. in Philology, Associate Professor

EDITORIAL BOARD:

Oleg O. Basov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Sergey P. Belov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Valery P. Volchkov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Valery D. Dmitrienko, Doctor of Technical Sciences, Professor (Ukraine)

Olga A. Ivaschuk, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Nikolay I. Korsunov, Honoured Science Worker of Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Alexander V. Koskin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Vadim A. Lomazov, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor (Russia)

Sergey I. Matorin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Vasily G. Rubanov, Honoured Science Worker of Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
Издатель: НИУ «БелГУ». Адрес издателя: 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85.
Журнал выходит 4 раза в год

Founder: Federal state autonomous educational establishment of higher education
«Belgorod State National Research University»
Publisher: Belgorod State National Research University
Address of publisher: 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia
Publication frequency: 4 /year

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

COMPUTER SIMULATION HISTORY

Маслаков Ю.Н., Бережной В.А., Ивашук О.А., Яценко В.М. Автоматизированная система мониторинга, оценки и прогнозирования роста и развития растений в условиях in vitro	3	Maslakov Y.N., Berezhnoy V.A., Ivaschuk O.A., Yacenco V.M. Automated system for monitoring, estimation and predicting the growth and development of plants in vitro	3
Шевцова М.В., Аверин Г.В. Квазилинейные дифференциальные уравнения первого порядка для описания состояния идеального газа	21	Shevtsova M.V., Averin G.V. Quasilinear differential equations for the description of the space of ideal gas conditions	21
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ		SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE	
Рыженко Н.О., Сторожко О.А., Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Игрунов К.К. Программная реализация деятельности студенческого конструкторского бюро НИУ «БелГУ»	29	Ryzhenko N.O., Storozhko O.A., Nesterova E.V., Igrunova S.V., Igrunov K.K. Program implementation of the activities of the student design Bureau of the national university «BelSU»	29
Егоров И.А., Жихарев А.Г., Маторин С.И. К вопросу оптимизации системно- объектных имитационных моделей	36	Egorov I.A., Zhikharev A.G., Matorin S.I. To the question of optimization of system-object imitation models	36
Михелев В.М., Мирошниченко А.С. Решение задачи классификации патологий головного мозга человека на снимках МРТ	43	Mikhelev V.M., Miroshnichenko A.S. The decision of the task of classification of human brain pathologies on MRI images	43
ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ		INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION	
Никольский П.Г., Кузнецов А.В., Архипов С.Н., Чистяков С.В. Компьютерная обучающая программа для подготовки специалистов в области телекоммуникаций	53	Nikolsky P.G., Kuznetsov A.V., Arkhipov S.N., Chistyakov S.V. Computer training programmes	53
Александров Д.Д., Косов Е.О., Архипов С.Н. Повышение живучести пассивной оптической сети путем формирования дополнительных маршрутов	63	Aleksandrov D.D., Cosov. E.O., Arkhipov S.N. Improving the life of the passive optical network by forming additional routes	63
Гончаренко Ю.Ю., Нестеренко В.Р. Использование случайных биометрических образов для генерации криптостойких последовательностей с применением генеративно- состязательных нейронных сетей	69	Goncharenko J.J., Nesterenko V.R. Use of random biometric images for generating crypto-resistant sequences using generative-competitive neural networks	69

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 681.518.2:602.4

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-1

Маслаков Ю.Н.¹
Бережной В.А.²
Иващук О.А.²
Яценко В.М.¹

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА,
ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ IN VITRO**

¹) ООО «ИНВИТРО ВИЖН», проспект Ватутина 4-26, г. Белгород, 308034, Россия

²) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: maslakov.yn@gmail.com, vaber93@mail.ru, ivaschuk@bsu.edu.ru, vowwva@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются подходы к решению проблемы точной и объективной регистрации и оценке роста и развития растений (отдельных его частей) на разных по составу питательных средах и различных стадиях развития, выращиваемых в условиях in vitro (в пробирке), что позволяет получить высококачественный безвирусный посадочный материал. Процесс фиксации параметров роста растений при натурных измерениях нарушает микроклимат, сформированный для оптимального развития растения, вносит серьезные погрешности из-за влияния человеческого фактора, и кроме того связан с необходимостью обработки больших объемов разнородных данных. Все это определяет перспективность использования современных информационных технологий, методов и средств автоматизации и моделирования, построения на этой основе автоматизированной системы мониторинга, оценки и прогнозирования роста и развития растений в условиях in vitro. На сегодняшний день существуют различные аппаратно-программные комплексы, предлагаемые зарубежными компаниями для фотографирования растений и оценки их морфометрических показателей, однако, они не учитывают условий нахождения растений в пробирке за стеклом, что вносит искажения изображения из-за запотевания и дефектов стекла, нелинейности на границах пробирки, блики и отражения окружающих объектов. В данной работе предложен прототип автоматизированной системы, при помощи которой осуществляется фотосъемка растения, производится сбор объективной информации о морфометрических параметрах растений в процессе их роста и производится оценка состояния растений на основе создания их объемной реконструкции.

Ключевые слова: реконструкция изображения, калибровка изображения, сегментация изображения, облако точек, сегментация облака точек, извлечение признаков.

UDC 681.518.2:602.4

Maslakov Y.N.¹
Berezhnoy V.A.²
Ivaschuk O.A.²
Yacenco V.M.¹

**AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING, ESTIMATION
AND PREDICTING THE GROWTH AND DEVELOPMENT
OF PLANTS IN VITRO**

¹) LLC "INVITRO VISION", Vatutina Avenue 4-26, Belgorod, 308034, Russia

²) Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Belgorod State University", 85, Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: maslakov.yn@gmail.com, vaber93@mail.ru, ivaschuk@bsu.edu.ru, vowwva@mail.ru

Abstract

The paper discusses approaches to solving the problems of accurate and objective registration and estimation of the growth and development of plants (and its individual parts) depending on the composition of nutrient media and various stages of development grown *in vitro*, which allows to obtain high-quality virus-free planting material. Manual measurements of plant parameters could violate the microclimate *in vitro* formed for the optimal plants development, causing serious errors due to the influence of human factors, and in addition, requires to handle a lot of information. The problems above could be solved by building an automated system based on modern information technologies, methods and tools for modeling. Existing various hardware and software systems for photographing plants and evaluating their morphometric parameters do not take into account the *in vitro* conditions. Photos of plants *in vitro* could have a condensate layer and various glass defects and distortions. In this paper, proposed prototype of an automated system, the main aim of which is to collect plants photos and calculate plants morphometric parameters with taking into account *in vitro* conditions.

Keywords: image reconstruction, image calibration, image segmentation, point cloud, point cloud segmentation, feature extraction.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время выращивание меристемных растений и их микроклональное размножение является современным продвинутом подходом для получения продукта на европейском рынке и перспективной областью развития на территории РФ. Процесс выращивания таких растений производится в условиях *in vitro* (в пробирке). Для улучшения показателей и скорости роста растения помещают в специальную питательную среду, состоящую из набора аминокислот, солей, сахаров и фитогормонов [Smith, 2013; Reekie, Bazzaz, 2011]. Однако выявление того, какая питательная среда окажет наиболее благоприятное воздействие на рост растения, не всегда является простой задачей. Для оценки влияния питательной среды на растение необходимо фиксировать морфометрические параметры растения, а также его частей – стебля, листьев и корневой системы, фиксировать динамику развития растения, детектировать окрас и оттенок растения, регистрировать появление инфекций на ранней стадии развития. Процесс фиксации параметров роста растений при натурных измерениях нарушает микроклимат, сформированный для оптимального развития растения, вносит серьезные погрешности из-за влияния человеческого фактора, и кроме того связан с необходимостью обработки больших объемов разнородных данных. Повысить правильность выбора и эффективность подбора параметров питательной среды потенциально может аппаратно-программный комплекс, который будет фиксировать основные параметры роста и развития растений и при помощи этих данных в начале оценивать корреляцию питательной среды с темпом развития растений, а затем выступать в роли системы принятия решений по конфигурации наиболее удачной среды.

Создание аппаратно-программного комплекса с выше описанным функционалом условно можно разбить на несколько этапов: построение прототипа установки, разработка автоматизированного процесса детектирования параметров растения, обучение системы, тестирование и улучшение принятых системой решений, коммерциализация полученного комплекса. В данной работе будут рассмотрены первые два этапа создания предложенной системы – конструирование прототипа установки и описание методов и алгоритмов фиксации параметров роста и развития растений в условиях *in vitro*.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель данной работы – это повышение эффективности процесса управления выращиванием растений в условиях *in vitro* за счет разработки системы по сбору объективной информации о росте и развитии растений (отдельных его частей) на разных по составу питательных средах и различных стадиях развития.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Рассмотрим системы получения первичной информации с ее последующей обработкой.

Сегодня существуют различные установки для фиксации параметров развития растений, но они обладают рядом недостатков. Например, в работах [Gibbs, Pound, Wells, Murchie, French, Pridmore, 2014; Kumar, Connor, Mikiavcic, 2014; Pound, French, Murchie, Pridmore, 2014] рассматриваются системы фотографирования растений и построения объемной модели, однако на основании полученных моделей не производится никакого процесса фиксации параметров растений. В работе [Güneş, Augün, 2017] авторы сделали акцент на получении морфологических показателей, но производили их фиксацию только по двумерным изображениям фотографий растений.

В книге [Gai, 2016] описываются различные технические подходы по получению морфометрических параметров по двумерным изображениям, а также по объемным моделям, но список этих параметров ограничен.

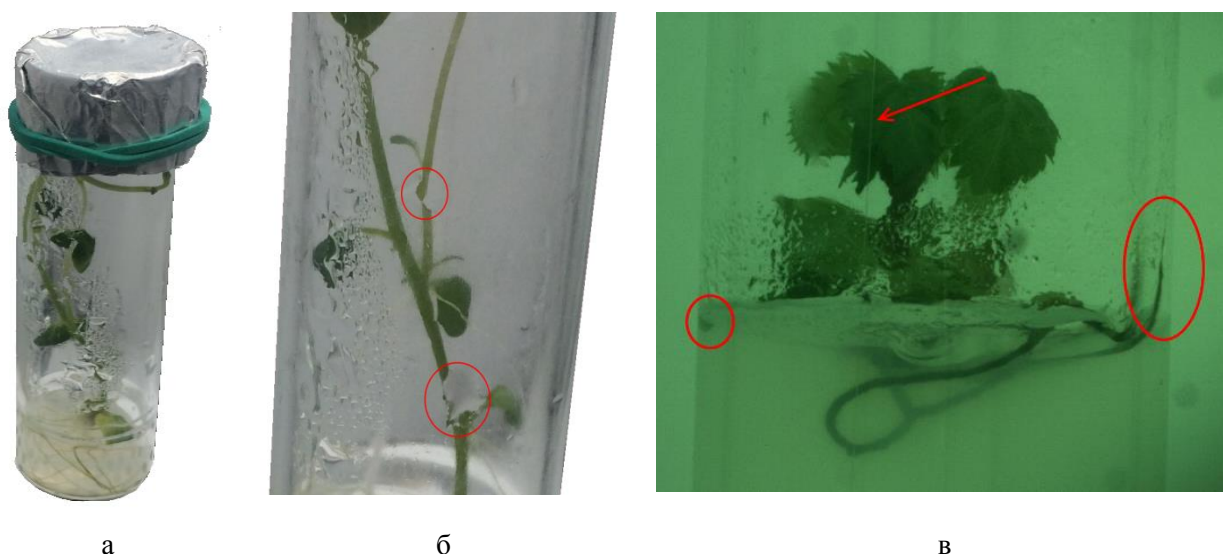


Рис. 1. Фотографии исследуемых образцов в системе *in vitro* и их особенности:

а) появление конденсат б) наличие артефактов и искажений в) вносимые стеклом нелинейности

Fig. 1. Plant's photos and its features: a) the appearance of condensate b) the presence of artifacts and distortions c) the nonlinearity of the image introduced by the glass

Главным отличием разрабатываемой авторами автоматизированной системы от вышеуказанных является обеспечение возможности обработки снимков растений в условиях *in vitro*, которые характеризуются следующими особенностями:

Для растений внутри пробирок создается особый микроклимат, в результате чего на их стенках может появляться конденсат (рис 1а).

Пробирка может иметь дефекты, потертости, царапины в структуре стекла и накладывать различные артефакты на фотографии (рис 1 б, в).

Пробирка вносит искажения при фотографировании сквозь стекло исследуемого образца, особенно сильно данный эффект проявляется на границах пробирки (рис 1в).

При освещении на стекле могут появляться блики и отражения окружающих объектов.

Невозможность использовать подход на основе лазерной сетки (Gai, 2016).

Были рассмотрены различные конструкции прототипа установки и принято решение: отказаться от сложных систем позиционирования камеры, например, как в [Gibbs, Pound, Wells, Murchie, French, Pridmore, 2014; Krainin, Henry, Ren, Fox, 2010]; использовать в конструкции

вращающуюся подставку, как в работе [Güneş, Aygün, 2017]; использовать направляющие для вертикального позиционирования камер.

ВЫДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ПРИЗНАКОВ И ВЕЛИЧИН

Для сбора объективной информации о росте и развитии растений необходимо выделить параметры, которые характеризуют анатомические и физиологические признаки и потенциально могут напрямую или косвенно демонстрировать результат изменения среды и условий выращивания на динамику роста растения.

Анализ литературы показал, что нельзя выделить четкую систему или классификацию анатомических и физиологических признаков, однако можно выявить наиболее часто используемые [Gehan, Fahlgren 2018], такие как длина побега, длина корней, количество листьев, количество корней, длина листовой пластины, ширина листовой пластины, толщина стебля, количество узлов, расстояние между узлами, общий объем растений, объем стебля, объем листьев, объем корневой системы и т.д.

По обозначенным признакам необходимо собрать информацию по каждому образцу. В перспективе после накопления необходимого объема базы возможна разработка экспертной системы, которая после обучения поможет сделать вывод о степени влияния конкретной питательной среды на рассматриваемое растение.

ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ФОТОСНИМКОВ

Непосредственное влияние на качество фотографий и дальнейшую объемную реконструкцию имеет источник освещения. Были проведены исследования следующих вариантов построения системы освещения: прямое и боковое точечное освещение; боковое рассеянное освещение; вертикальное точечное освещение; вертикальное рассеянное освещение; контражурный свет; прямое лазерное излучение; обратное лазерное излучение; УФ-излучение; освещение объекта на различном фоне.

Сделаны следующие выводы:

а) для минимизации бликов при освещении растений в пробирках требуется рассеянный, заполняющий свет. Необходим источник с регулируемым уровнем освещения (для получения качественных фотографий растений и снимков, и для последующего анализа требуется разный уровень освещения).

б) цвет освещения существенно влияет на результаты анализа изображений. Отражение и поглощение различных длин волн органами растения может предоставить дополнительную информацию о его состоянии, а также о наличии болезней. Наиболее качественными источниками искусственного излучения являются лампы накаливания, однако для создания высокого уровня освещенности необходимы лампы высокой мощности, которые выделяют большое количество тепла и обладают высокой температурой. Для целей проекта более предпочтительными являются светодиодные источники света с цветовой температурой 4000-4500 К с параметрами цветопередачи CRI>80.

в) для выявления различных патологий необходима съемка в УФ-диапазоне.

г) для исследований в ИК-диапазоне требуется наличие оптических сенсоров и оптических систем без ИК-фильтров.

д) цвет фона значительно влияет на качество изображений. Сравнив все плюсы и минусы темного и светлого фона, было принято производить фотографирование объекта на светлом фоне.

Таким образом, определены основные требования к системе мультиспектрального освещения:

- система освещения должна обеспечивать следующие режимы освещения: светотональный, заполняющий, контровой, ключевой;

- обеспечение бестеневого освещения образца, расположенного в пробирке, должно достигаться путем распределенного размещения источников света;
- источники освещения должны обеспечивать рассеянный, бестеновой свет;
- регулирование уровня освещения должно обеспечиваться бесступенчато в диапазоне от 50 до 8000 лк;
- должна обеспечиваться возможность освещения монохроматическим спектром со следующими длинами волн: 465 нм, 525 нм, 660 нм, а также белого света с цветовой температурой 4000K и $CRI \geq 80$.

- должна обеспечиваться возможность освещения любым сочетанием уровней излучения устанавливаемых источников излучения для формирования мультиспектра.

С целью проведения исследований и получения изображений в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектров необходимо также обеспечить устройство излучателями инфракрасного и ультрафиолетового спектра. Для обеспечения необходимой чувствительности оптических сенсоров в диапазоне ИК-излучения требуется использовать сенсоры без установленного на них ИК-фильтра, что будет выполнено во вновь закупаемых образцах оптических сенсоров.

Для инфракрасного излучения наиболее приемлемым является диапазон, расположенный ближе к видимому излучению. Для ультрафиолетового диапазона допустимым для освещения растений является ближний УФ-диапазон с длинами волн 315-400 нм. Так как необходимо управление мощностью излучения в данном диапазоне, то наилучшим образом подходят светодиодные источники излучения УФ-диапазона (длина волны 385 нм, 365 нм).

Благодаря различию коэффициентов рассеяния, пропускания и отражения в различных участках диапазона излучения от ультрафиолетового до инфракрасного на изображениях, сделанных при различном их сочетании можно увидеть детали, которые в обычном свете не детектируются.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА УСТАНОВКИ

Определим основные требования к структуре и функционалу разрабатываемого прототипа установки:

- 1) Наличие фиксирующего механизма для исследуемого образца на подставке.
- 2) Возможность вращения исследуемого образца на подставке.
- 3) Возможность производить фотосъемку растений с разных ракурсов.
- 4) Наличие различных видов освещения в различных спектрах.
- 5) Возможность осуществлять точную регулировку положения камер и исследуемого образца.

Исходя из требований к структуре и функционалу разрабатываемого прототипа установки был спроектирован и изготовлен испытательный стенд для измерения морфометрических признаков растений (рис. 2). На рисунке 3 отображена структурная схема стенда. Стенд обладает 2мя оптическими модулями (рис. 4), подключенными через коммутатор, поддерживающий 1 Gb Ethernet, 2мя шаговыми двигателями для вращения исследуемого образца и для изменения высоты камер, аппаратно-вычислительную платформу Arduino для управления шаговыми двигателями и системой освещения, а также различное осветительное оборудование.



Рис. 2. Прототип установки
Fig. 2. Stand prototype

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выделение значимых признаков растения было произведено на основе обработки двумерных изображений растений, полученных в ходе вращения пробирки с исследуемым образцом и их фотографированием, а также на основе объемной реконструкции растений по полученным фотоснимкам. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки, которые будут описаны в результатах и обсуждении.

Получение параметров растения в двумерном пространстве

Процесс расчета морфометрических параметров на основе фотоснимков состоит из следующих шагов: локализация пробирки, калибровка и обработка изображения внутри пробирки, локализация растения, выявление необходимых признаков и величин.

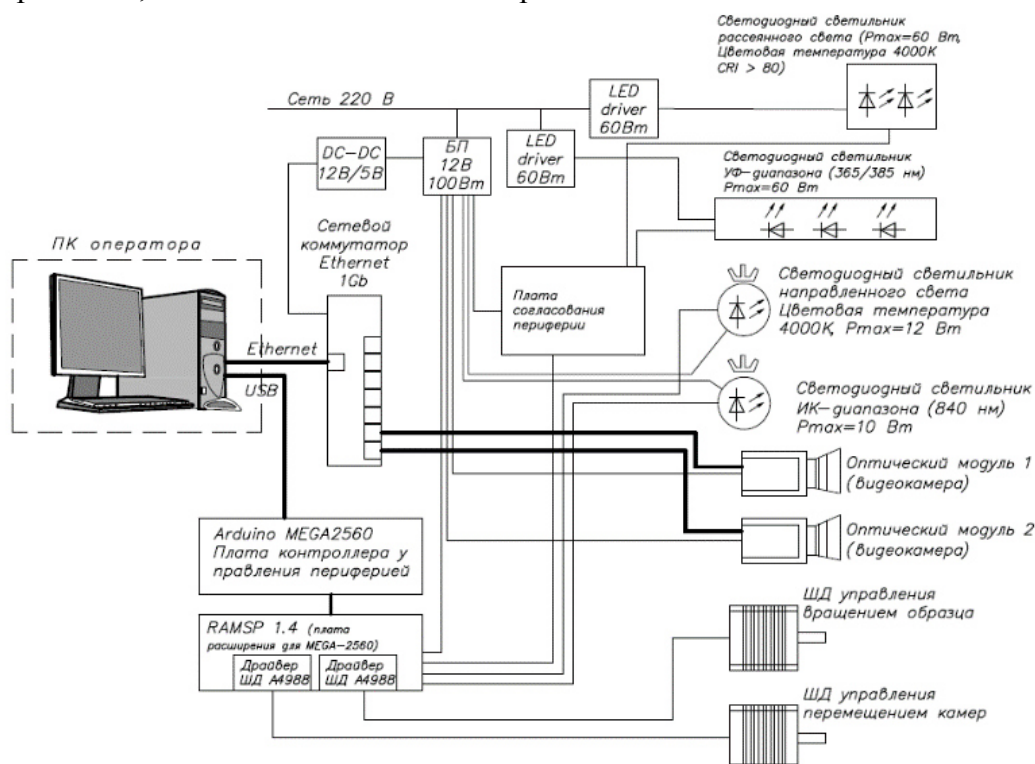


Рис. 3. Структурная схема станда
Fig. 3. Structural scheme of the stand

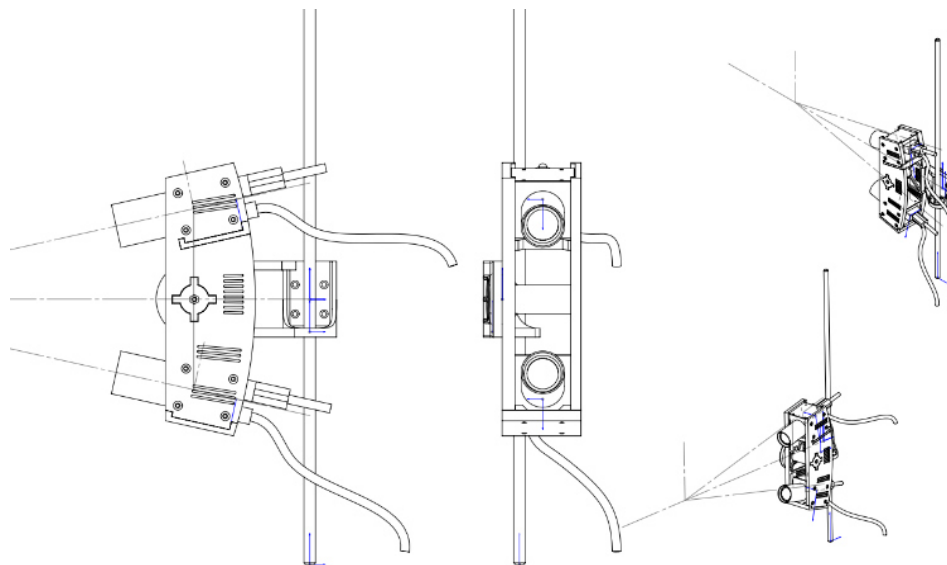


Рис. 4. Взаимное расположение оптических модулей
Fig. 4. Mutual arrangement of optical modules

Локализация объекта на однородном фоне при помощи средств компьютерного зрения является тривиальной задачей. По выделенному изображению с растением и пробиркой необходимо провести калибровку для минимизации радиальной дисторсии. Калибровку можно провести, поместив изображение с шахматным паттерном внутрь пробирки (рис. 5).

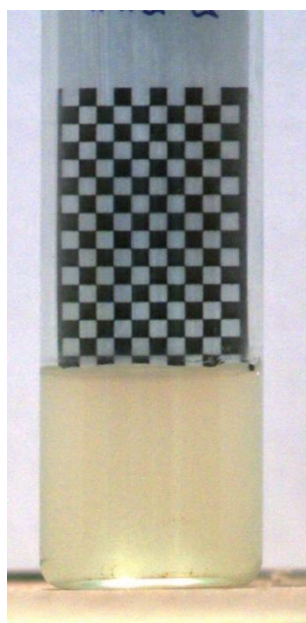


Рис. 5. Калибровка изображения камеры при помощи калибровочной доски
Fig. 5. Calibrate the camera image using the calibration board

Локализовать растение можно при помощи использования комбинации бинарных масок, полученных в разных цветовых палитрах (рис. 6).

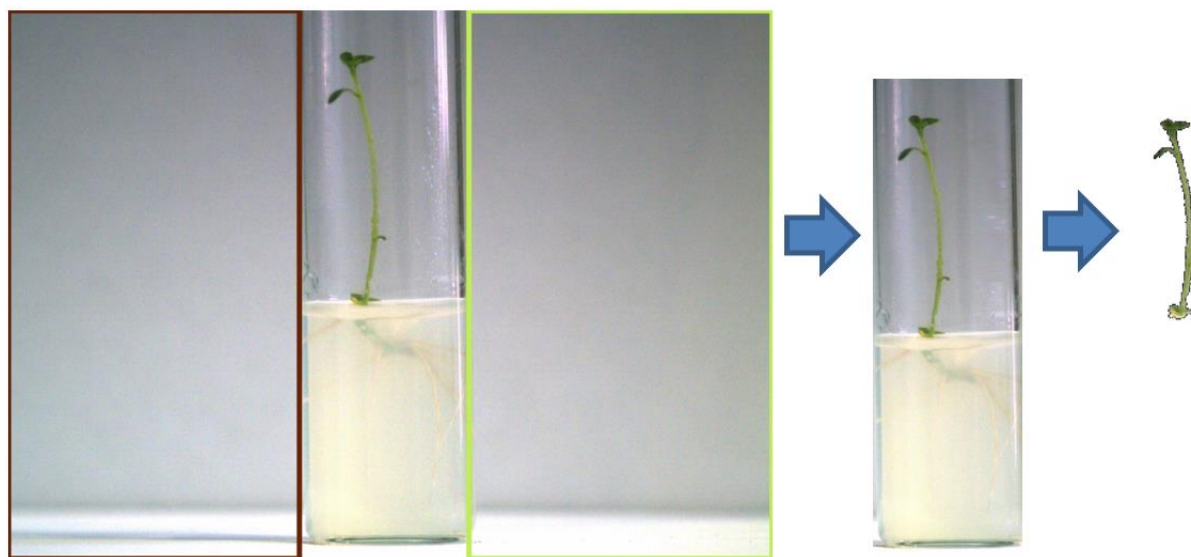


Рис. 6. Локализация растения в пробирке на изображении
Fig. 6. Localization of the plant in vitro on the image

Для сегментации частей растения выделим скелет растения, локализуем узловые точки и построим граф растения.

На основе работ [Zhang, Suen, 1984; Lee, Kashyap, Chu, 1994; Abu-Ain, Abdullah, Bataineh, Omar, 2013] были изучены различные подходы к построению скелета объекта и получен результат, показанный на рис. 7. По полученному скелету растения можно выделить узловые и краевые точки и построить граф растения (рис. 8).

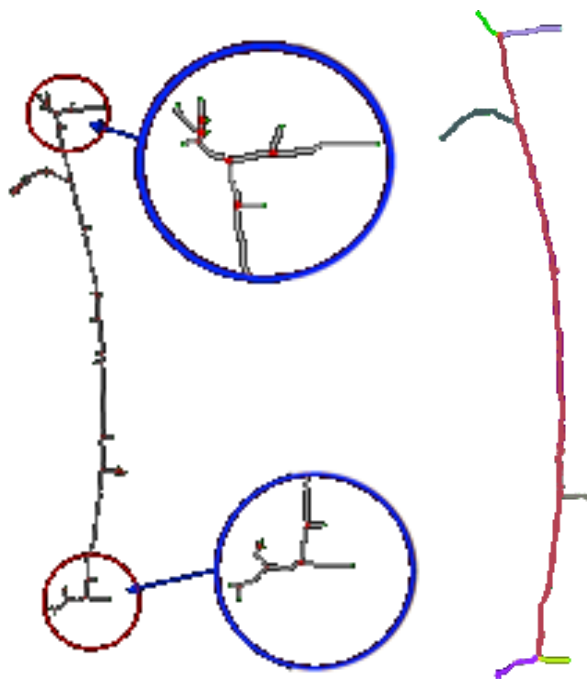


Рис. 7. Скелет выделенного растения и его сегментация на ствол и листья
Fig. 7. Skeleton of a selected plant and its segmentation into stem and leaves

В полученном графе были отфильтрованы ребра от узловых точек к листьям графа евклидово расстояние которых меньше порогового. Такие ребра могут быть ложно рассмотрены в виде листьев растения и нуждаются в исключении из графа.

На основании полученного графа можно оценить длину побега как евклидово расстояние от нижней до верхней узловой точки. Т.к. части растения могут иметь определенный изгиб рекомендуется вводить промежуточные вершины в ребрах графа.

Модель стебля растения можно представить в виде последовательно соединенных цилиндров. Рассчитав объем каждого такого цилиндра и просуммировав эти объемы, можно найти объем стебля растения. Количество листьев рассчитывается на основании количества ребер графа от узловых точек до листьев графа. В рассматриваемом примере следует исключить листья, образованные вершинами 1-2 и 2-3, т.к. они находятся на границе основания стебля и корневой системы.

Объем листьев рассчитать на основании полученных данных не представляется возможным, т.к. листовая пластина может иметь сложную форму и ее нельзя представить в виде модели цилиндра.

При достаточной прозрачности питательной среды, используя подходы, описанные выше, можно найти длину и объем корневой системы.

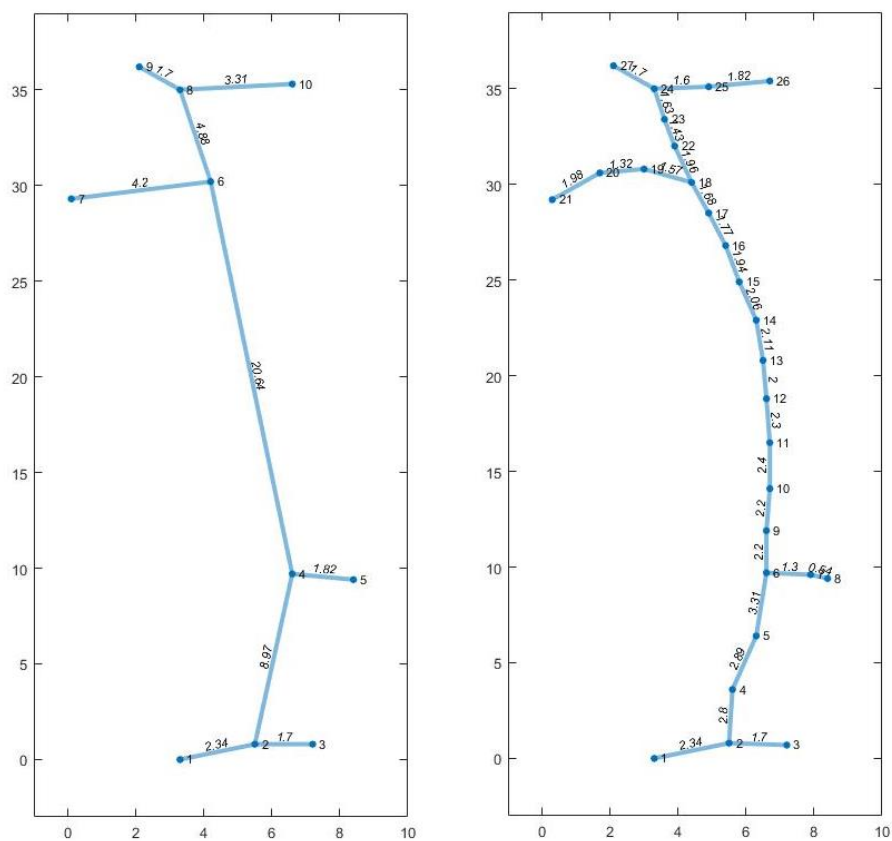


Рис. 8. Граф растения: а) показаны только основные вершины б) с введением промежуточных вершин
Fig. 8. Plant's graph: a) only the main vertices b) with the intermediate vertices

Следует отметить, что результаты измерений могут варьироваться в зависимости от угла вращения растения. Так, при определенном угле вращения листья могут быть скрыты стеблем или другими листьями. В виду этого необходимо делать серию вычислений морфометрических параметров при различном угле вращения растения, сопоставлять полученные параметры и из полученных данных находить максимальные значения длин и объемов, что однозначно является существенным минусом расчета морфометрических параметров растения на двумерном изображении.

Также важно отметить, что фиксация морфометрических признаков может использоваться при относительно простой структуре растения, в которой стебель четко выделен, а листья растения не перекрывают друг друга и стебель растения.

Для получения более точного набора морфометрических данных растения необходимо использование методов трехмерной реконструкции и выделения необходимых параметров из полученного облака точек.

Получение параметров растения на основе объемной реконструкции

В связи с тем, что по серии двумерных фотоснимков растений невозможно выделить все заявленные морфометрические параметры рассмотрим расчет параметров на основе объемной реконструкции растений.

Для выбора метода создания объемной реконструкции объекта были рассмотрены существующие подходы и выделены наиболее приемлемые для использования в прототипе установки:

PMVS – Patch based Multi-View Stereo. Данный алгоритм использует набор изображений с известными матрицами проекций, которые рассчитываются на основе известной матрицы внутренних параметров камеры, а также значений смещения и вращения камеры относительно проецируемой плоскости. Алгоритм генерирует набор прямоугольных элементов, покрывающих видимую поверхность изображений. Процесс спроектирован по принципу сопоставляй, расширяйся, фильтруй. Работа алгоритма начинается с поиска особых точек на наборе сопоставляемых изображений, затем циклически алгоритм начинает строить сетку прямоугольных элементов, берущих свое начало в области найденных особых точек. На каждом шаге происходит автоматическая фильтрация ложных сопоставлений и прямоугольных элементов до тех пор, пока не будет достигнута заранее заданная точность [Furukawa, Ponce, 2010; Torok, 2012; Furukawa, Hernández, 2015].

VN – Volumetric Visual Hull. Данный алгоритм создает объемную реконструкцию на основе пересечения силуэтов объекта с различных ракурсов, также часто называется методом пересечения объемов. Для функционирования алгоритма необходимо заранее знать матрицы проекций каждого изображения. В начале формируются битовые карты (силуэты) объекта на всех снимках: если пиксель изображения принадлежит объекту, то соответствующий бит в битовой карте принимается равным единице, иначе нулю. По пересечению силуэтов с разных снимков можно восстановить геометрическую модель объекта [Laurentini, 1994; Matusik, Buehler, Raskar, Gortler, McMillan, 2000; Slabaugh, Schafer, Malzbender, Culbertson, 2001; Vogiatzis, Esteban, Torr, Cipolla, 2007].

SL – Gray-coded Structured Light. Алгоритм использует решетчатую сетку на основе паттернов, генерируемых при помощи кода Грея. Данная сетка накладывается на источник освещения и помогает воссоздать карту глубины. Далее на основе карт глубин можно реконструировать объект исследования [Gupta, 2007; Young, Beeson, Davis, Rusinkiewicz, Ramamoorthi, 2007; Kawasaki, Furukawa, Sagawa, Yagi, 2008].

В процессе разработки было выявлено, что приемлемый результат реконструкции позволяет получить PMVS метод. Для его работы необходима серия фотоснимков с разных ракурсов и известные матрицы проекций для каждого из фотоснимков.

Учитывая, что необходимо вычислить матрицы проекций вращающейся вокруг своей вертикальной оси пробирки можно воспользоваться калибровочными паттернами. Обзор литературы показал, что есть подходы, при которых калибровочное изображение необязательно должно полностью отображаться на снимке, а достаточно лишь части отображаемого паттерна. Например, в [Zhang, 2000] используется шаблон калибровки на основе дескрипторов, а в [Vogiatzis, Hernández, 2010] с использованием набора кругов с заранее известным расположением.

Однако такой подход вносит определенные погрешности матрицы вращений и смещений, на основании которых рассчитывается матрица проекций.

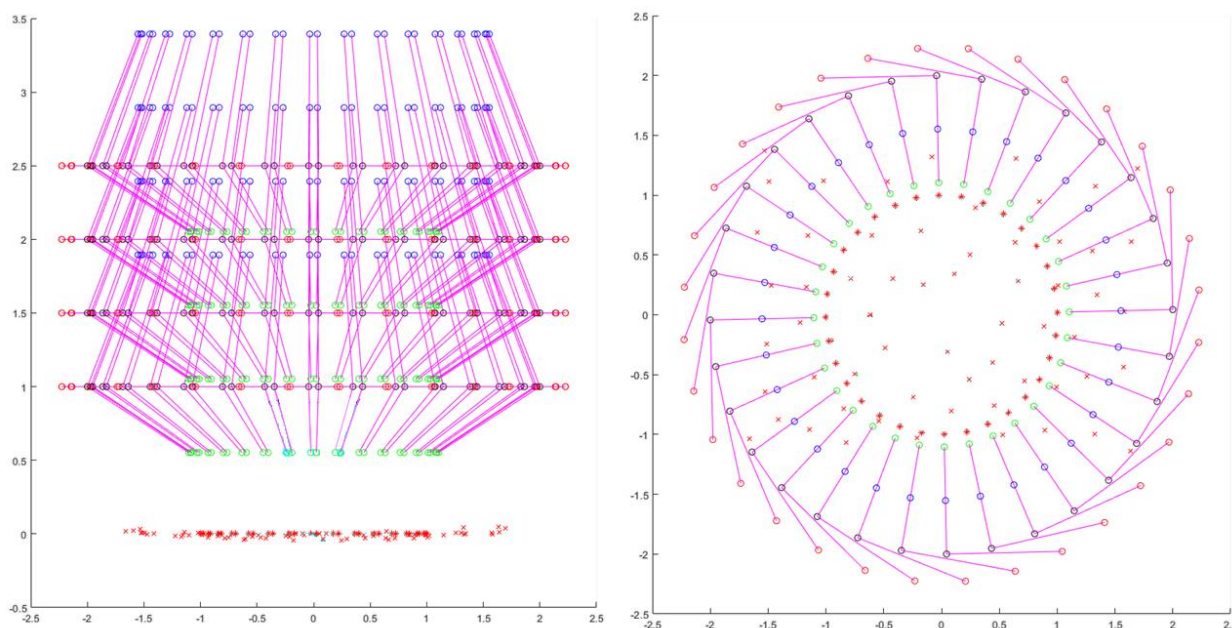


Рис. 9. Математическая модель расположения камер относительно растения на высотах h_1, h_2, h_3 : а) вид сбоку б) вид сверху. Обозначения: красные кресты – точки принадлежащие плоскости, на которую смотрят камеры. Черные точки – расположение камер. Зеленые, красные, синие точки – принадлежащие осям камер X, Y, Z соответственно. Розовые линии со направлены с линиями координатных осей камер

Fig. 9. The mathematical model of the location of the cameras around the plant at heights h_1, h_2, h_3 :

a) side view b) top view. Legend: red crosses are points belonging to the plane on which the cameras are looking.

Black dots – camera's positions. Green, red and blue points – belonging to the X, Y, Z axes of the cameras corresponding. Pink lines with directional lines with the axes of the cameras

Для ликвидации вышеуказанных погрешностей и используя тот факт, что заранее известно на какие углы поворачивается вращающаяся подставка, можно принять за начало системы координат пробирку с растением и рассчитать математическую модель изменения матриц смещений, вращений и проекций камер относительно пробирки (рис. 9).

Далее по полученным данным можно воспользоваться PMVS метод и построить облако точек, которое является объемной моделью растения (рис. 10а). Следует отметить, что при использовании PMVS метода решается проблема наличия царапин на стекле, а также наличия визуальных артефактов, т.к. одна и та же точка в пространстве рассматривается с разных ракурсов и область с искажением автоматически исключается из реконструкции.

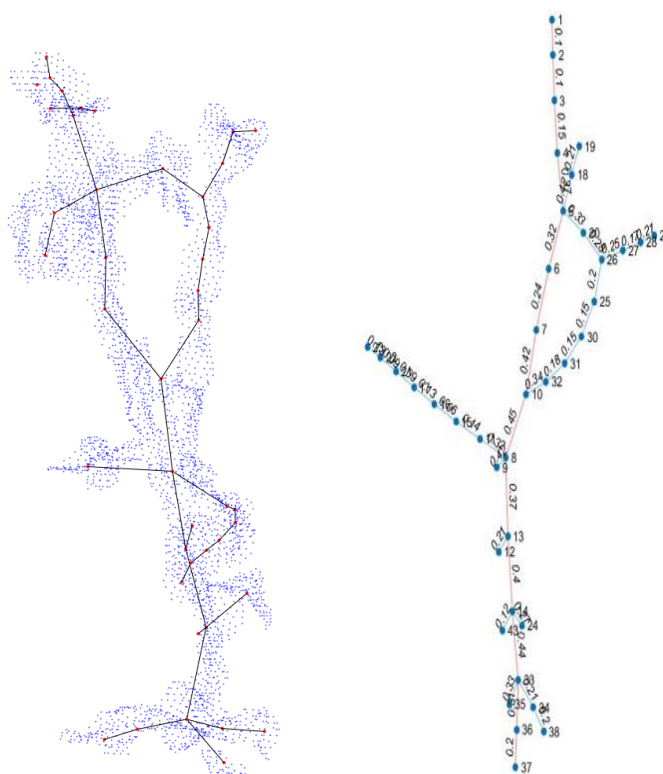


Рис. 10. а) Объемная модель растения в виде облако точек б) взвешенный граф модели растения
Fig. 10. a) Point cloud representing 3D plant model b) weighted graph of volumetric model

На основании работы [Tagliasacchi, Zhang, Cohen-Or, 2009] в облаке точек можно найти локальные центроиды для каждой области скопления точек, представить полученные данные в виде связанного взвешенного графа и построить скелет растения (рис 10б). Используя подход для сегментации частей растения, описанный при использовании модели в двумерном пространстве и расширив его на трехмерную модель, можно выделить ствол, листья и корневую систему растения (рис. 11 а,б). На основании полученного графа можно определить длину стебля, его изгиб, количество листьев, их длину и ширину. Посчитать объем каждого листа, ствола и корневой системы можно применяя подход, описанный в [Chang, Wu, Tsai, Chiu, 2017], который заключается в создании серии поуровневых срезов объекта, вычислении их площади, а затем интегрировании полученных результатов для вычисления объема объекта.

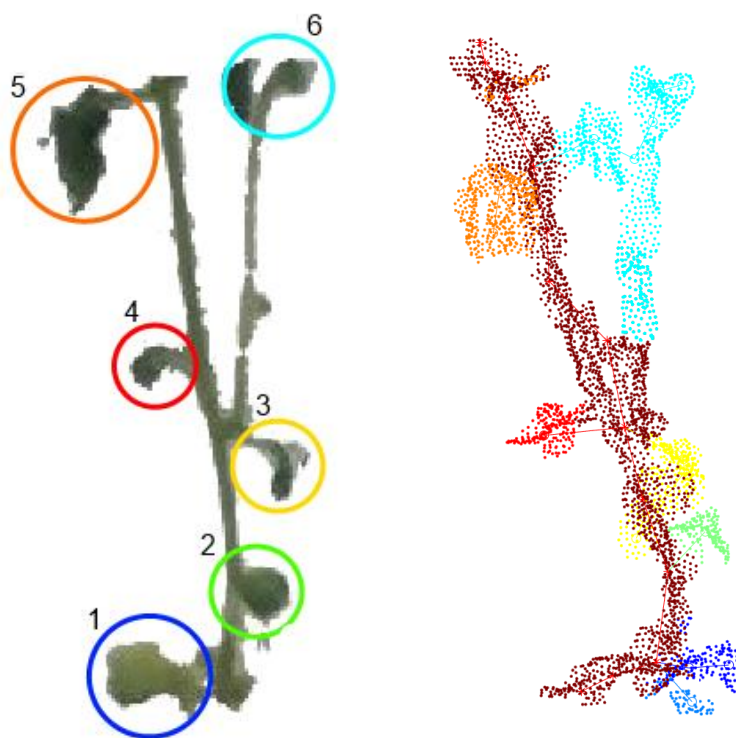


Рис. 11. а) Указание номеров листьев растения б) сегментация облака точек растения на его части (цвета сегментов листьев совпадают с выделенными листьями на рис. 11а)

Fig. 11. a) Numeration of the plant leaves b) cloud point segmentation on its parts (colours of leaf segment is the same as on fig. 11a)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании рассмотренных алгоритмов были протестированы описанные методы для получения морфометрических параметров по серии двумерных изображений и по объемной реконструкции растения.

Полученные морфометрические параметры по серии фотографий для растения, показанного на рис. 6, приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Пример полученных морфометрических параметров растения на основании серии фотоснимков

Table 1

An example of the obtained morphometric parameters of the plant using a series of photographs

Длина стебля, мм	Кривизна стебля, град	Объем стебля, мм ³	Количество листьев, шт
34.68	14.92°	120.11	4

Таблица 2

Вершины и расстояния между ними на базе графа на рис. 8а

Table 2

Vertices and distances between them based on the graph at the fig. 8a

Вершина a_i	1	2	2	4	4	6	6	8	8
Вершина b_i	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние между a_i и b_i	2.34	1.7	8.97	1.82	20.64	4.2	4.88	1.7	3.31

Преимущества метода получения морфометрических показателей по серии фотографий показал свою алгоритмическую и вычислительную простоту по сравнению с методом выделения показателей на основе объемной реконструкции. Однако данный метод может применяться только при структурной простоте рассматриваемого растения, т.к. части растения могут перекрывать друг друга, например, один лист может закрывать другой. Также минусом данного метода является то, что с разных ракурсов значение морфометрических показателей будет отличаться и следует выбирать те значения, в которых значение параметров максимально. Самый главный недостаток – это невозможность рассчитать все необходимые показатели растений, например, объем листьев, длина листовая пластины, ширина листовая пластины, толщина стебля. Исходя из данных недостатков метода, был разработан более сложный, но более точный метод получения морфометрических параметров на основе объемной реконструкции.

Полученные морфометрические параметры на основании объемной реконструкции для растения, показанного на рис. 11, приведены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Пример полученных морфометрических параметров растения для растения, показанного на рис. 11

Table 3

An example of the obtained morphometric parameters of the plant for a plant shown in fig. 11

Длина стебля, мм	Кривизна стебля, град.	Объем стебля, мм ³	Количество листьев, шт.
36.6	22.14°	172.26	6

Таблица 3

Пример полученных морфометрических параметров листьев для растения, показанного на рис. 11

Table 4

An example of obtained morphometric parameters of leaves for a plant shown in fig. 11

Лист №	Длина листовая пластины, мм	Ширина листовая пластины, мм	Объем листа, мм ³
1	5.11	4.76	30.31
2	2.72	2.61	9.33
3	6.84	2.74	20.56
4	4.02	4.43	13.44
5	7.78	6.72	63.07
6	6.33	5.08	45.50

Предложенный метод показал, что при его использовании можно рассчитать все необходимые морфометрические показатели роста и развития растения, а также является более точным и надежным по сравнению с 1м методом, т.к. учитывает структуру растения в трехмерном, а не двумерном пространстве.

Время выполнения с использованием компьютера с процессором Intel Core i5 7th Gen первого метода примерно 2 секунды; время выполнения второго метода примерно 660 секунд, из которых – 360 сек на создание объемной реконструкции, 300 сек на получение морфометрических показателей.

Ссылки на источники с дополнительным видеоматериалом приведены в таблице 5.

Таблица 5

Наименования и URL-адреса видеоматериалов с визуализацией полученных данных

Table 5

Names and URLs of video materials with visualization of the received data		
Наименование видеоматериала	Адрес URL	QR-код
Первичные данные	https://youtu.be/xOuGSixZQcA	
Выделение объекта растения на последовательности изображений	https://youtu.be/EdiWcOZ3oJA	
Каркас (скелет) растения	https://youtu.be/nKrpK0joK9A	
Кластеризация частей растения	https://youtu.be/9WosGRbl4J8	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В текущей работе были рассмотрены подходы к решению проблемы точной и объективной регистрации и оценке роста и развития растений (отдельных его частей) на разных по составу питательных средах и различных стадиях развития, выращиваемых в условиях *in vitro* (в пробирке).

Для процесса объективной фиксации, параметров роста растения был собран прототип установки, разработаны два метода по выделению и расчету необходимых параметров растения. Приведен сравнительный анализ каждого метода, описаны его преимущества и недостатки.

Следующими шагами для развития данной исследовательской работы будет накопление записей в базе данных о параметрах разных растений, разработка системы поддержки принятия решений по управлению выращиванием растений в условиях *in vitro*, интеграция разработанного комплекса на реальные предприятия.

Список литературы

1. Smith, R.H. (2013), Plant tissue culture: techniques and experiments, Academic Press, Texas, TX.
2. Reekie, E. and Bazzaz, F.A. (2011), Reproductive allocation in plants. Academic Press, San Diego, SA.
3. Gibbs, J., Pound, M.P., Wells, D.M., Murchie, E.H., French, A.P., and Pridmore, T.P. (2014), Three-dimensional reconstruction of plant shoots from multiple images using an active vision system, *Plant Physiology*, 166 (4), 1688–1698.
4. Kumar, P., Connor, J. and Mikiavcic, S. (2014), High-throughput 3D reconstruction of plant shoots for phenotyping, *13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, 211-216.
5. Pound, M.P., French, A.P., Murchie, E. H., and Pridmore, T.P. (2014), Automated recovery of 3D models of plant shoots from multiple colour images, *Plant Physiology*, 114.
6. Güneş E.O. and Aygün S. (2017), Growth monitoring of plants using active contour technique, *6th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Fairfax, USA, 1-5.
7. Gai, J. (2016), “Plants detection, localization and discrimination using 3D machine vision for robotic intra-row weed control”, Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
8. Krainin, M., Henry, P., Ren X., and Fox, D. (2010), Manipulator and object tracking for in hand model acquisition., *IEEE International Conference on Robots and Automation In Proceedings*, Funchal, Portugal.
9. Gehan, M., Fahlgren, N. (2018), “Summary of Output Measurements” [Online], available at: https://plantcv.readthedocs.io/en/latest/output_measurements/ (Accessed 23.06.2019)
10. Zhang, T.Y. and Suen, C.Y. (1984), A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, *Communications of the ACM*, 27(3).
11. Lee, T.C., Kashyap, R. L. and Chu C.N. (1994), Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 56(6), 462-478.
12. Abu-Ain, W., Abdullah, S.N., Bataineh, B., Abu-Ain, T. and Omar, K. (2013), Skeletonization algorithm for binary images, *Procedia Technology*, 11, 704-709.
13. Furukawa, Y. and Hernández, C. (2015), Multi-view stereo: A tutorial. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision, now Publishers Inc., Hanover, MA.
14. Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010), Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, *2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, Minnesota, 32(8), 1362-1376.
15. Torok, M.M. (2012), “Autonomous sample collection using image-based 3d reconstructions”, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
16. Matusik, W., Buehler, C., Raskar, R., Gortler, S. J. and McMillan, L. (2000), Image-based visual hulls, *27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, 369-374.
17. Laurentini, A. (1994), The visual hull concept for silhouette-based image understanding, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 16(2), 150-162.
18. Slabaugh, G., Schafer, R., Malzbender, T. and Culbertson, B. (2001), A survey of methods for volumetric scene reconstruction from photographs, *In Volume Graphics 2001*, Springer, Vienna.
19. Vogiatzis, G., Esteban, C.H., Torr, P.H. and Cipolla, R. (2007), Multiview stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12), 2241-2246.
20. Gupta, P. (2007), “Gray code composite pattern structured light illumination”, Ph.D. Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
21. Young, M., Beeson, E., Davis, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R. (2007), Coded structured Light, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007, Minneapolis, MN, 1-8
22. Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y., (2008), Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008, Anchorage, Alaska, 1-8.
23. Li, B., Heng, L., Koser, K. and Pollefeys, M. (2013), A multiple-camera system calibration toolbox using a feature descriptor-based calibration pattern, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 1301-1307.
24. Vogiatzis, G. and Hernández, C. (2010), “Automatic camera pose estimation from dot pattern” [Online], available at: <http://george-vogiatzis.org/calib/> (Accessed 23.06.2019)

25. Tagliasacchi, A., Zhang, H. and Cohen-Or, D. (2009), Curve skeleton extraction from incomplete point cloud, *In ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(3), 71.

References

1. Smith, R.H. (2013), *Plant tissue culture: techniques and experiments*, Academic Press, Texas, TX.
2. Reekie, E. and Bazzaz, F.A. (2011), *Reproductive allocation in plants*. Academic Press, San Diego, SA.
3. Gibbs, J., Pound, M.P., Wells, D.M., Murchie, E.H., French, A.P., and Pridmore, T.P. (2014), Three-dimensional reconstruction of plant shoots from multiple images using an active vision system, *Plant Physiology*, 166 (4), 1688–1698.
4. Kumar, P., Connor, J. and Mikiavcic, S. (2014), High-throughput 3D reconstruction of plant shoots for phenotyping, *13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, 211-216.
5. Pound, M.P., French, A.P., Murchie, E. H., and Pridmore, T.P. (2014), Automated recovery of 3D models of plant shoots from multiple colour images, *Plant Physiology*, 114.
6. Güneş E.O. and Aygün S. (2017), Growth monitoring of plants using active contour technique, *6th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Fairfax, USA, 1-5.
7. Gai, J. (2016), “Plants detection, localization and discrimination using 3D machine vision for robotic intra-row weed control”, Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
8. Krainin, M., Henry, P., Ren X., and Fox, D. (2010), Manipulator and object tracking for in hand model acquisition., *IEEE International Conference on Robots and Automation In Proceedings*, Funchal, Portugal.
9. Gehan, M., Fahlgren, N. (2018), “Summary of Output Measurements” [Online], available at: https://plantcv.readthedocs.io/en/latest/output_measurements/ (Accessed 23.06.2019)
10. Zhang, T.Y. and Suen, C.Y. (1984), A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, *Communications of the ACM*, 27(3).
11. Lee, T.C., Kashyap, R. L. and Chu C.N. (1994), Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 56(6), 462-478.
12. Abu-Ain, W., Abdullah, S.N., Bataineh, B., Abu-Ain, T. and Omar, K. (2013), Skeletonization algorithm for binary images, *Procedia Technology*, 11, 704-709.
13. Furukawa, Y. and Hernández, C. (2015), Multi-view stereo: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, now Publishers Inc., Hanover, MA.
14. Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010), Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, *2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, Minnesota, 32(8), 1362-1376.
15. Torok, M.M. (2012), “Autonomous sample collection using image-based 3d reconstructions”, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
16. Matusik, W., Buehler, C., Raskar, R., Gortler, S. J. and McMillan, L. (2000), Image-based visual hulls, *27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, 369-374.
17. Laurentini, A. (1994), The visual hull concept for silhouette-based image understanding, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 16(2), 150-162.
18. Slabaugh, G., Schafer, R., Malzbender, T. and Culbertson, B. (2001), A survey of methods for volumetric scene reconstruction from photographs, *In Volume Graphics 2001*, Springer, Vienna.
19. Vogiatzis, G., Esteban, C.H., Torr, P.H. and Cipolla, R. (2007), Multiview stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12), 2241-2246.
20. Gupta, P. (2007), “Gray code composite pattern structured light illumination”, Ph.D. Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
21. Young, M., Beeson, E., Davis, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R. (2007), Coded structured Light, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007*, Minneapolis, MN, 1-8
22. Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y., (2008), Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008*, Anchorage, Alaska, 1-8.
23. Li, B., Heng, L., Koser, K. and Pollefeys, M. (2013), A multiple-camera system calibration toolbox using a feature descriptor-based calibration pattern, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 1301-1307.

24. Vogiatzis, G. and Hernández, C. (2010), "Automatic camera pose estimation from dot pattern" [Online], available at: <http://george-vogiatzis.org/calib/> (Accessed 23.06.2019)

25. Tagliasacchi, A., Zhang, H. and Cohen-Or, D. (2009), Curve skeleton extraction from incomplete point cloud, *In ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(3), 71.

Маслаков Юрий Николаевич, директор, ООО «ИНВИТРО ВИЖН»

Бережной Владислав Александрович, аспирант кафедры информационных и робототехнических систем Института инженерных и цифровых технологий

Иващук Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и робототехнических систем Института инженерных и цифровых технологий

Яценко Владимир Михайлович, инженер, ООО «ИНВИТРО ВИЖН»

Maslakov Yuriy Nikolayevich, LLC "INVITRO VISION"

Berezhnoy Vladislav Alexandrovich, postgraduate student of Department of Information and Robotics Systems at Institute of Engineering and Digital Technologies

Ivashchuk Olga Alexandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information and Robotics Systems at Institute of Engineering and Digital Technologies

Yatsenko Vladimir Mikhaylovich, Engineer, LLC "INVITRO VISION"

UDC 536.1: 514.8

DOI 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-2

Shevtsova M.V.¹
Averin G.V.²

**QUASILINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR THE DESCRIPTION
OF THE SPACE OF IDEAL GAS CONDITIONS**

¹⁾Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov,
46 Kostyukova St, Belgorod, 308012, Russia

²⁾Belgorod State University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: averin@bsu.edu.ru, mashashev81@gmail.com

Abstract

Relevance

Today the classical thermodynamics as fundamentals of many physical sciences does not possess the finished and accurate axiomatic creation of the theory. Its many provisions and ratios are based on the empirical facts which are recognized as apriori and are not proved in terms of theoretical parcels.

Problem

In this paper the problem of a wording of thermodynamic provisions and ratios for spaces of ideal gas conditions is considered on the basis of analysis of solutions of partial differential equations of the first order.

Methods

In this work the method of characteristics for the solution of the quasilinear differential equations of the first order was used. And also formulas and dependences of differential geometry and means of computer mathematics are applied.

Results

It is shown that characteristics of partial differential equations are connected with entropy as a thermodynamic function of condition. Geometric presentation of the received integrated surfaces is executed. The connection between physical content of thermodynamic sizes (temperature, entropy, energy) and their mathematical analogs is established. By numerical methods using the means of computer mathematics it is illustrated the possibility of establishing consistent patterns of implementation of thermodynamic processes and cycles at the description them as functions of time.

Conclusions

The assumption is formulated that irreversibility of thermodynamic processes can be connected with temporal features of implementation of these processes. The offered approach allows to give simple geometric interpretation of basic provisions and ratios of classical thermodynamics.

Keywords: ideal gas; provisions and ratios of thermodynamics; geometric interpretation.

УДК 536.1: 514.8

Шевцова М.В.¹
Аверин Г.В.²

**КВАЗИЛИНЕЙНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО
ПОРЯДКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА**

¹⁾Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
ул. Костюкова, 46, г. Белгород, 308012, Россия

²⁾Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: averin@bsu.edu.ru, mashashev81@gmail.com

Аннотация

Актуальность

Классическая термодинамика как основа многих физических наук на настоящее время не обладает законченным и четким аксиоматическим построением теории. Некоторые из ее положений и соотношений базируются на эмпирических фактах, признаются априорными и не обоснованы с точки зрения теоретических посылок.

Проблема

В данной статье рассматривается задача формулировки положений и соотношений термодинамики для пространства состояний идеального газа на основе анализа решений дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка.

Методы

В настоящей работе были использованы метод характеристик для решения квазилинейных дифференциальных уравнений первого порядка, а также формулы и зависимости дифференциальной геометрии и средства компьютерной математики.

Результаты

Показана связь характеристик дифференциальных уравнений в частных производных с энтропией, как термодинамической функцией состояния. Выполнено геометрическое представление полученных интегральных поверхностей и установлена взаимозависимость между физическим содержанием термодинамических величин (температуры, энтропии, энергии) и их математическими аналогами. Показано, что численными методами с использованием средств компьютерной математики можно установить закономерности осуществления термодинамических процессов и циклов при описании их функциями времени.

Выводы

Сформулировано предположение, что необратимость термодинамических процессов может быть связана с темпоральными особенностями осуществления этих процессов. Предложенный подход позволяет дать простую геометрическую интерпретацию основным положениям и соотношениям классической термодинамики.

Ключевые слова: идеальный газ; положения и соотношения термодинамики; геометрическая интерпретация.

INTRODUCTION

The classical thermodynamics is a theoretical basis for many physical sciences. But thermodynamics' theory is not full, its many aspects are contradictory and tangled, a number of provisions has no logical clarity [3, 11]. Axiomatic creation of thermodynamics, despite many works in this area [2, 4, 5, 7, 10, 13, 17–20], is not completed. The problem of entropy and development of various systems of justification of its existence is connected with thermodynamic axiomatics. The fact of existence of entropy as one of basic provisions in thermodynamics, the fundamental principle of its increase and communication of entropy with irreversibility of processes in the nature are not completely studied.

The second problem is related with the fact that operating with thermodynamic processes which proceed in time, the classical thermodynamics does not give the answer to a question what is the place of time in the theory. Time exception paradox in ratios of classical thermodynamics is connected with a concept of equilibrium (infinitely slow) process. However, the set of experimental justifications in thermodynamics is not connected at all with implementation very slow (equilibrium, quasistatic) processes [12].

It is impossible to claim that the entity of a problem of irreversibility is determined by a slow or rapid current of process. However, the hypothesis that irreversibility is related with features and patterns of development of thermodynamic processes in time has the right for existence. Therefore, this problem can be studied only at entering of time parameter to the equations of classical thermodynamics.

To understand the issues stated above, let's address to a concept of ideal gas. This model is rather simple and evident and allows geometric interpretation of the basic concepts and ratios in three-dimensional space. However, the analysis of references is showed that the works devoted to disclosure of geometric sense and interpretation of thermodynamic sizes, ratios and laws are not enough. This direction of researches is affected most of all in K. Caratheodory [7], Falk and Jung [20] and Mlodzeevsky's works [9]. There is no fair and evident idea about connection between thermodynamic processes and objects and geometrical structures and the relations yet. Proceeding from this, there are no obvious analogies between the physical maintenance of thermodynamic values (temperature, heat, entropy, energy, etc.) and their mathematical models.

In works of authors [1, 14, 15, 16] attempts of application of methods and means of differential geometry at justification of models of thermodynamic conditions, processes, ratios and regularities were made earlier. In our opinion, perspective approach in the solution of this task lies in the analysis of solutions of partial differential equations of the first order and differential Pfaff forms [6] which are the basis for the theory of thermodynamics.

So, the purpose of this article is establishment of communication between the physical maintenance of the main thermodynamic values and their models on the basis of application of methods and means of differential geometry. It will allow to give geometric interpretation to basic provisions and ratios of classical thermodynamics. The research of this task at the description of processes in time is possible both by the analytical solution of the differential equations of thermodynamics, and the application of methods and means of computer mathematics.

MAIN PART

PURPOSE OF WORK

The thermodynamic system usually refers to a set of macroscopic bodies and fields of the physical nature, which represents a complete object and interact as among themselves and with the environment. At the same time the condition of a system is defined as a set of its thermodynamic properties which parameters are formed under the influence of environmental conditions in particular timepoint. It means for ideal gas that each its state is unambiguously defined by values of specific volume v and pressure p . Let's assume that at commission in time of any process l parameters of a condition of ideal gas can be presented by the parametrical equations concerning time τ : $v = v(\tau)$ and $p = p(\tau)$.

Let's use the skilled fact of temperature existence. Temperature T is called the measure of a deviation of a condition of the studied thermodynamic system from a condition of thermal balance of a reference body in the standardized conditions. The corresponding reference body is called the thermometer. Depending on what reference body is accepted as the thermometer, different scales of empirical temperatures are distinguished. At the same time the ideal gas scale represents a special form of a measuring temperature scale.

The next skilled fact is existence of a concept of amount of heat and thermal capacities. Amount of heat Q is the physical quantity characterizing process of heat exchange between a thermodynamic system and the environment. Thermal capacity c_l is entered in physics as a special type of value which is one of thermal characteristics of substance. There is a set of methods of determination of thermal capacities of gases, solids and liquids in experience [12]. The equation determining the amount of heat in process which is necessary for temperature change of a body is usually presented concerning temperature and thermal capacity of a body in the form:

$$c_l = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_l \quad (1)$$

Thus, proceeding from the experimental data, it is possible to claim that the amount of heat and temperature are connected with pressure and specific volume of ideal gas.

Let's construct on the plane of Cartesian coordinates the geometric system in the form of the space of condition of ideal gas where coordinate axes correspond to independent variables v and p . As between values Q and T in any process there is a communication (1), ratios will be correct:

$$\frac{\partial Q}{\partial v} = c_p \frac{\partial T}{\partial v} \text{ and } \frac{\partial Q}{\partial p} = c_v \frac{\partial T}{\partial p}, \quad (2)$$

where c_p and c_v are thermal capacity of ideal gas with a constant pressure and constant volume respectively.

According to Klaperyon's equation $T = pv/R_i$ temperature has a look of uniform function of the second degree. So it satisfies to Euler's formula:

$$T = \frac{1}{2} \left(v \frac{\partial T}{\partial v} + p \frac{\partial T}{\partial p} \right) \quad (3)$$

Taking into account ratios (1) this equation can be presented in the form of the linear non-uniform partial equation of the first order concerning value Q :

$$\frac{v}{2c_p} \frac{\partial Q}{\partial v} + \frac{p}{2c_v} \frac{\partial Q}{\partial p} = T \quad (4)$$

The solution $Q = Q(v, p)$ for the equation (4) geometrically represents a surface in three-dimensional space (v, p, Q) which is called an integrated surface. Let's use method of characteristics which are defined by the system of the ordinary differential equations [8, p. 41]:

$$2c_p \frac{dv}{v} = 2c_p \frac{dp}{p} = \frac{dQ}{T} = ds, \quad (5)$$

where s is any real parameter. If we will determine parameter s as the arch length changing along a characteristic curve, the equations (5) will take a form:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{v}{2c_p}; \quad \frac{dp}{ds} = \frac{p}{2c_v}; \quad \frac{dQ}{ds} = \frac{pv}{R_i} = T \quad (6)$$

From the first two equations (5) the dependence for the value ds turns out. It has a form of known thermodynamic equation used in definition of entropy of ideal gas:

$$ds = \frac{dQ}{T} = 2c_p \frac{dv}{v} + 2c_v \frac{dp}{p};$$

$$s - s_0 = c_p \ln \frac{v}{v_0} + c_v \ln \frac{p}{p_0} \quad (7)$$

Thus, in geometric representation the entropy is arch length for the characteristic curves corresponding to the field of the directions which is defined by the system of the equations (5). From the theory it is also known [8, p.42] that the integrated solution $Q = Q(v, p)$ of the equation (4) can be covered with collection of characteristics. And any characteristic curve determined by the equations (5) and having the common point with the integrated surface entirely lies on this surface.

The integrated solution of the equation (4) can be found in an analytical way. Cauchy problem for this equation is connected with finding of the integrated surface $Q = Q(v, p)$ passing through the set curve of any process l which can be presented in a parametrical form concerning time τ :

$$v_l = v_l(\tau); p_l = p_l(\tau); Q_l = Q_l(\tau).$$

The general solution of a system of the equations (5) concerning entropy has a look:

$$v = v_l \exp\left(\frac{s}{2c_p}\right); p = p_l \exp\left(\frac{s}{2c_v}\right);$$

$$Q = Q_l + c_p \beta_1 \frac{p_l v_l}{R_i} \left(\exp\left(\frac{s}{c_p \beta_1}\right) - 1 \right);$$

$$\beta_1 = \frac{2c_v}{c_p + c_v}. \quad (8)$$

For receiving the integrated surface in three-dimensional space (v, p, Q) we set parametrically a curve of process l and exclude values s and τ [8, p. 42].

Let's assume that process of l is isobaric, and the line of process l , through which the integrated surface has to pass, is set by the parametrical equations concerning time τ :

$$v_l = v_l + \alpha_v \tau; p_l = p_1;$$

$$Q = c_p T_l = c_p \frac{(v_l + \alpha_v \tau) p_1}{R_i} \quad (9)$$

v_l, p_l - thermodynamic parameters of gas in some initial point where $\tau=0$.

Having substituted (9) in (8) and excluding values s and τ we will receive:

$$Q = c_p \frac{pv}{R_i} \left(\beta_1 + \beta_2 \left(\frac{p}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right), \quad (10)$$

$k = c_p/c_v$ - adiabatic curve indicator.

Similar results can be received by numerical methods, using means of computational mathematics. Let that condition of hydrogen in initial timepoint has parameters –pressure $p_1 = 101325$ Pa and specific volume $v_1 = 11,12720$ m³/kg.

At expansion in isobaric thermodynamic process during 100 sec. specific volume increased to $v_2 = 15,20087$ m³/kg. At the same time temperature have changed from $T_1 = 273,15$ K to $T_2 = 373,15$ K.

We construct the integrated surface which is the solution of the equation (4), using the system of computer mathematics Maple (Fig. 1).

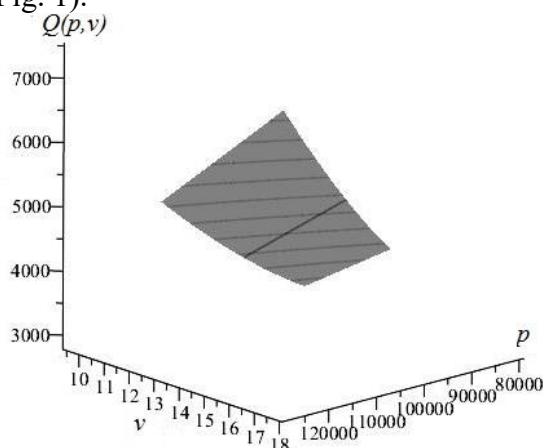


Рис. 1. Интегральная поверхность для количества теплоты при изобарном процессе расширения водорода

Fig 1. Integrated surface for amount of heat at isobaric process of expansion of hydrogen

Thus, on the basis of solutions of partial differential equations of the first order it is possible to describe changes in time of conditions of ideal gas at thermodynamic processes.

GEOMETRIC INTERPRETATION OF THERMODYNAMIC VALUES

It is known that integrated surfaces of the quasilinear equation (4) can be covered with the collection of characteristics which are defined by equations (5). The functions $f_1 = \frac{v}{2c_p}$, $f_2 = \frac{p}{2c_v}$, $f_3 = T$ in the equation (4) define a field of the directions in space (v, p, Q) where in each point of this space there is a direction which directional cosines are proportional to f_1, f_2, f_3 . Thus, the equation (4) resolves itself into requirement that in each point of integrated surface $Q = Q(v, p)$ vector determined by the field of the directions stated above have to be in the tangent plane to this surface [8, p. 41].

Let process l in space (v, p, Q) is set in parametrical form (8). Let's put l_0 a projection of curve l on the vOp plane. Then for the equation (4) Cauchy problem is formulated in a form: to find the integrated surface of the equation (4) passing through the set curve l in the neighborhood of projection l_0 . Geometric interpretation of Cauchy problem assumes that in space (v, p, Q) through each point of process l it is necessary to carry out characteristic of the equation (4) and "to stick together" from them an integrated surface.

On the vOp plane it looks as follows (fig. 2, a). There is a projection of process l_0 from the beginning at point $A_0(v_1, p_1)$ and the end at point $B_0(v_2, p_2)$. Through points A_0 and B_0 characteristics 1, isotherms 2 and adiabatic curves 3 pass. The collection of characteristics is described by the equation $p = Cv^k$, proceeding from the first integral of a system (5), collection of isotherms – $pv = C$. In turn, the collection of adiabatic curves is described by the equation $pv^k = C$. The entropy (7) in such representation will be characteristic's arc length, and adiabatic curves will represent lines of level for characteristics at $s = \text{const}$. Adiabatic curves, isotherms and characteristics in pairs form some network of curvilinear not orthogonal coordinates on the vOp plane.

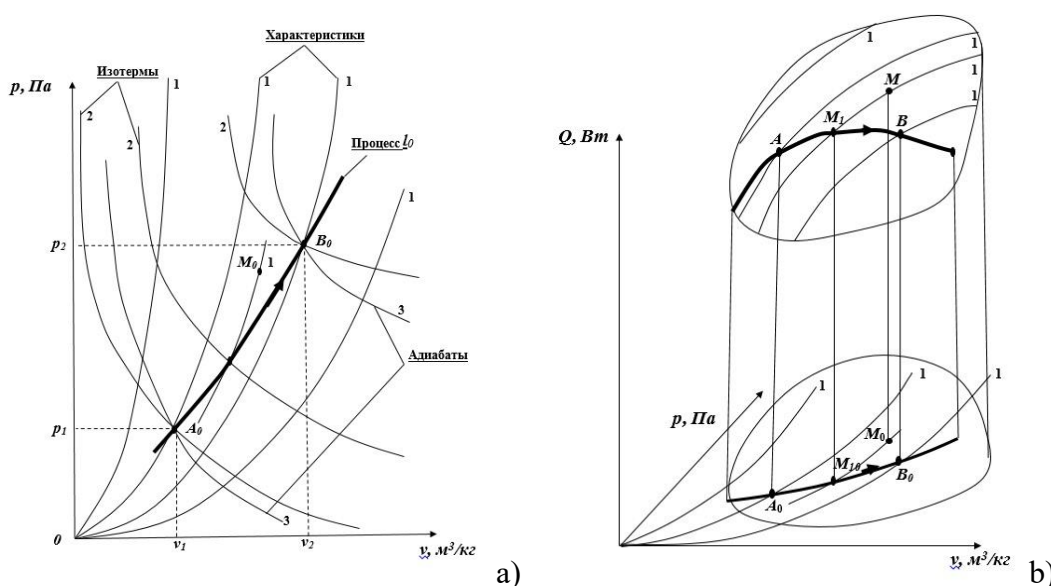


Рис. 2. Геометрическая интерпретация задачи Коши для уравнения (4):

а – на плоскости vOp ; б – в пространстве (v, p, Q)

Fig. 2. Geometric interpretation of Cauchy's problem for equation (4):

а – on vOp plane; б – in (v, p, Q) space

The geometric solution of Cauchy problem in (v, p, Q) space is constructed as follows. Through any point M_0 on vOp plane characteristic is carried out until its crossing with process l_0 . After that it is necessary to put $Q = Q_l(\tau)$ taking into account the parametrical equations of process l (fig. 2, b). The integrated surface $Q = Q(v, p)$ will characterize amount of heat for all set of conditions of ideal gas in the neighborhood of process l or its projection l_0 .

In space (v, p, Q) it is possible to construct a surface of energy $u = u(v, p)$ for conditions of ideal gas, using for this purpose the equation $u = c_p T = c_p \frac{pv}{R_i}$. Then for any process dl change of amount of heat can be presented in a differential form like the sum of two functions $dQ = du + F(p, v)$. This ratio will have an appearance of energy conservation equation. At the same time a problem of definition of function $F(p, v)$ is arisen which can be solved by means of computational mathematics. It will allow to establish provisions under which the differential form $dQ = du + F(p, v)$ can have the known appearance of energy conservation equation $dQ = du + pdv$.

CONCLUSIONS

The offered approach gives the chance to carry out geometric interpretation of basic provisions and ratios of thermodynamics as Cauchy problem for partial quasilinear differential equations of the first order has the evident geometric image in multidimensional spaces of conditions. It allows to give a mathematical definition for entropy and to present it as an arc length of characteristic of the equation (4). In turn, time and entropy describe states and processes of change of conditions of ideal gas in parametrical form. Presentation of these physical values as parameters gives a chance to enter time into the equations of classical thermodynamics and to give simple geometric interpretation to its basic provisions.

References

1. Averin G.V. Sistemodinamika [Systemdynamics]. Doneck: Donbass, 2014. 405 p. (in Russian)
2. Afanas'eva-Jerenfest T.A. Neobratimost', odносторонnost' i vtoroe nachalo termodinamiki [Irreversibility, unilaterality and second law of thermodynamics]. Zhurn. prikl. Fiziki. T. 5, Issue 3–4 (1928). С. 3–28. (in Russian)

3. Bazarov I.P. Termodinamika [Thermodynamics]. Izd. 4-e. M.: Vysshaya shkola, 1991. 376 p. (in Russian)
4. Born M. Kriticheskie zamechanija po povodu tradicionnogo izlozhenija termodinamiki. V kn.: Razvitie sovremennoj fiziki [Critical remarks concerning a traditional statement of thermodynamics. In book: Development of modern physics]: Per. s nem. M.: Nauka, 1964. Pp. 223–256. (in Russian)
5. Guhman A.A. Ob osnovanijah termodinamiki [About the thermodynamics bases]. M., Jenergoatomizdat, 1986. 383 p. (in Russian)
6. Zvyagintseva A.V., Averin G.V. Integrirovaniye otdelnykh mnogomernykh uravneniy Pfaffa imeyuschih vajnoe prikladnoe znachenie [Integration of some multidimensional Pfaff equations of important applications] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika. Fizika. №27 (248). Vypusk 45 (2016). Pp. 102 – 114. (in Russian)
7. Karateodori K. Ob osnovah termodinamiki. V kn.: Razvitie sovremennoj fiziki [About fundamentals of thermodynamics. In book: Development of modern physics] Per. s nem. M.: Nauka, 1964. Pp. 188–222. (in Russian)
8. Koshlyakov I.S. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki [Partial Differential Equations of Mathematical Physics] M.: Vischa shkola, 1970. 712 p. (in Russian)
9. Mlodzeevskij A.B. Geometricheskaja termodinamika [Geometrical thermodynamics] M.: Izdatelstvo MGU, 1956. 94 p. (in Russian)
10. Petrov N., Brankov J. Sovremennye problemy termodinamiki [Modern problems of thermodynamics] M.: Mir, 1986. 285 p. (in Russian)
11. Prigozhin I., Kondepudi D. Sovremennaya termodinamika [Modern thermodynamics]. Per. s angl. M.: Mir, 2002. 461 p. (in Russian)
12. Roberts D. Teplota i termodinamika [Heat and Thermodynamics] Per. s angl. pod red. Vukalovicha M.P. M.: Izdatelstvo tekhniko-teor. literatury, 1950. 592 p. (in Russian)
13. Frankfurt U. K istorii aksiomatiki termodinamiki [In history of axiomatics of thermodynamics. In book: Development of modern physics] V kn.: Razvitie sovr. fiziki: Per. s nem. M.: Nauka, 1964. Pp. 257–292. (in Russian)
14. Shevtsova M.V., Averin G.V., Zvyagintseva. 2016. K voprosu obosnovaniya polozheniy termodinamiki metodami differentsialnoy geometrii mnogomernykh prostranstv [About justification of provisions of thermodynamics by methods of differential geometry of multidimensional spaces] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika. Fizika. №27 (248). Vypusk 45 (2016). Pp. 36 – 44. (in Russian)
15. Zvyagintseva A.V., Averin G.V. Integrirovaniye otdel'nykh mnogomernykh uravneniy Pfaffa imeyuschih vazhnoe prikladnoe znachenie [Integration of some multidimensional Pfaff equations of important applications] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Matematika. Fizika. №27 (248). Vypusk 45 (2016). Pp. 102– 114.
16. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Shevtsova M.V. and Kurtova L.N. Probabilistic methods of a complex assessment of quantitative information // Research Journal of Applied Sciences 11 (7), 2016. Pp. 415 – 418.
17. Gyarmati I. On the Fundamentals of Thermodynamics // Acta Chim. Hung. 30, 1962. Pp. 147- 206.
18. Landsberg P.T. Main Ideas in the Axiomatics of Thermodynamics // Pure and Appl. Chem. 22, 1970. Pp. 215-227.
19. Lieb E. H., Yngvason J. The physics and mathematics of the second law of thermodynamics // Physics Reports. Vol. 310. № 1. 1999. Pp. 1 – 96.
20. Falk G. and Jung H. Axiomatik der Thermodynamik // Hdb. Phys. III/2. Berlin, 1959. Pp. 119–175.

Список литературы

1. Аверин Г.В. Системодинамика. Донецк: Донбасс, 2014. 405 с.
2. Афанасьева-Эренфест Т.А. Необратимость, односторонность и второе начало термодинамики // Журн. прикл. Физики. Т. 5, вып. 3–4 (1928). С. 3–28.
3. Базаров И.П. Термодинамика. Изд. 4-е. М.: Высшая школа, 1991. 376 с.
4. Борн М. Критические замечания по поводу традиционного изложения термодинамики. В кн.: Развитие современной физики: Пер. с нем. М.: Наука, 1964. С. 223–256.

5. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. М., Энергоатомиздат, 1986. 383 с.
6. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. Интегрирование отдельных многомерных уравнений Пфаффа имеющих важное прикладное значение // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Математика. Физика. №27 (248). Выпуск 45 (2016). С. 102 – 114.
7. Каратеодори К. Об основаниях термодинамики. В кн.: Развитие современной физики: Пер. с нем. М.: Наука, 1964. С. 188–222.
8. Кошляков И.С. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Вища школа, 1970. 712 с.
9. Млодзеевский А.Б. Геометрическая термодинамика. М.: Издательство МГУ, 1956. 94 с.
10. Петров Н., Бранков Й. Современные проблемы термодинамики. М.: Мир, 1986. 285 с.
11. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. Пер. с англ. М.: Мир, 2002. 461 с.
12. Робертс Д. Теплота и термодинамика. Пер. с англ. под ред. Вукаловича М.П. М.: Издательство технико-теор. литературы, 1950. 592 с.
13. Франкфурт У. К истории аксиоматики термодинамики. В кн.: Развитие совр. физики: Пер. с нем. М.: Наука, 1964. С. 257–292.
14. Шевцова М.В., Аверин Г.В., Звягинцева. К вопросу обоснования положений термодинамики методами дифференциальной геометрии многомерных пространств // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Математика. Физика. №27 (248). Выпуск 45 (2016). С. 36 – 44.
15. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. Интегрирование отдельных многомерных уравнений Пфаффа имеющих важное прикладное значение // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Математика. Физика. №27 (248). Выпуск 45 (2016). С. 102 – 114.
16. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Shevtsova M.V. and Kurtova L.N. Probabilistic methods of a complex assessment of quantitative information // Research Journal of Applied Sciences 11 (7), 2016. Pp. 415–418.
17. Gyarmati I. On the Fundamentals of Thermodynamics // Acta Chim. Hung. 30, 1962. Pp. 147- 206.
18. Landsberg P.T. Main Ideas in the Axiomatics of Thermodynamics // Pure and Appl. Chem. 22, 1970. Pp. 215-227.
19. Lieb E. H., Yngvason J. The physics and mathematics of the second law of thermodynamics // Physics Reports. Vol. 310. № 1. 1999. Pp. 1 – 96.
20. Falk G. and Jung H. Axiomatik der Thermodynamik // Hdb. Phys. III/2. Berlin, 1959. Pp. 119–175.

Шевцова Мария Витальевна, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, кандидат физико-математических наук

Аверин Геннадий Викторович, заведующий кафедрой общей математики, доктор технических наук, профессор

Shevtsova Maria Vitalevna, Associate Professor of Computer Software and Automated Systems, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Averin Gennady Viktorovich, Head of the Department of General Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE

УДК 004.9

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-3

Рыженко Н.О.
Сторожко О.А.
Нестерова Е.В.
Игрунова С.В.
Игрунов К.К.

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО НИУ «БЕЛГУ»**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: 1153118@bsu.edu.ru, 1152982@bsu.edu.ru, nesterova@bsu.edu.ru, igrunova@bsu.edu.ru, konstantin_igr@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассмотрены проблемы, связанные с разрозненностью различных студенческих конструкторских бюро. Проанализированы характерные особенности существующих информационных ресурсов, обуславливается актуальность создания единого информационного портала. Реализация целевой программы «Система селективной поддержки молодых ученых НИУ «БелГУ» потребовала разработку веб-портала студенческого конструкторского бюро, которое является не только неотъемлемой частью подготовки квалифицированных инженерно-технических кадров для высокотехнологичных сфер экономики, но и важное место занимает в научной жизни университета. Для анализа предметной области были применены нотации IDEF0 и IDEF3, которые позволили проанализировать протекающие процессы в студенческом конструкторском бюро, отобразить их взаимосвязи и спроектировать будущую структуру веб-портала студенческого конструкторского бюро НИУ «БелГУ». Портал содержит информацию о каждом СКБ, событиях, новостях, оборудовании, личный кабинет пользователя, возможность подачи онлайн заявки на вступление в бюро.

Ключевые слова: студенческое конструкторское бюро, функциональная модель, контекстная диаграмма IDEF0, IDEF3, информационный портал.

UDC 004.9

Ryzhenko N.O.
Storozhko O.A.
Nesterova E.V.
Igrunova S.V.
Igrunov K.K.

**PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE ACTIVITIES
OF THE STUDENT DESIGN BUREAU OF THE NATIONAL
UNIVERSITY «BELSU»**

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: 1153118@bsu.edu.ru, 1152982@bsu.edu.ru, nesterova@bsu.edu.ru, igrunova@bsu.edu.ru, konstantin_igr@mail.ru

Abstract

This article discusses the problems associated with the fragmentation of various student design bureaus. The characteristic features of existing information resources are analyzed, and the relevance of creating a single information portal is determined. The implementation of the target program «The system of selective support for young scientists of the National Research University «BelSU» required the development of a web portal of the student design bureau, which is not only an integral part of the training of qualified engineering and technical personnel

for high-tech industries, but also occupies an important place in the academic life of the university. For the analysis of the subject area, IDEF0 and IDEF3 notations were used, which allowed to analyze the processes in the student design bureau, to display their interrelations and to design the future structure of the web portal of the student design bureau of the Belgorod State University. The portal contains information about each student design bureau, events, news, equipment, user's personal account, the possibility of filing an online application for entry into the bureau.

Keywords: student design bureau, functional model, contextual diagram IDF0, IDF3, information portal.

В рамках реализации целевой программы «Система селективной поддержки молодых ученых НИУ «БелГУ» было образовано студенческое конструкторское бюро (СКБ) [1]. СКБ является не только неотъемлемой частью подготовки квалифицированных инженерно-технических кадров для высокотехнологичных сфер экономики, но и важное место занимает в научной жизни университета и города. СКБ вносит свой вклад в качественную подготовку молодых специалистов, обеспечивает доступность информации и актуальность новостей о научной деятельности студентов и молодых ученых. Студенческое конструкторское бюро представляет собой организацию, в пределах которой происходит ускоренное взаимодействие будущих специалистов и компаний сектора высоких технологий за счёт наличия необходимой инфраструктуры и услуг.

В настоящее время каждый вуз организует работу студенческих бюро самостоятельно. Каждое СКБ имеет свой web-сайт на отдельном ресурсе. Соответственно, пользователю, желающему получить информацию о нескольких СКБ, необходимо каждый сайт искать отдельно, используя в итоге несколько информационных порталов [2]. Поэтому, в НИУ «БелГУ» возникла идея создания единого информационного портала университета, содержащего информацию о различных СКБ, где каждый желающий и в первую очередь студенты и молодые ученые могли бы получить доступ к исчерпывающей информации о существующих структурах в городе и стране.

Таким образом, сайт СКБ сконцентрирует заинтересованных в научной деятельности школьников, студентов, молодых ученых, аспирантов, преподавателей высшей школы в определенном цифровом поле, что отвечает требованиям современных поколений и технологий.

Целью данной работы являлось совершенствование деятельности студенческих конструкторских бюро, заключающееся в привлечении участников, в улучшении научной деятельности студенческого научного общества при помощи информационного портала.

Для достижения поставленной цели, необходимо изучить теоретические аспекты работы СКБ, исследовать существующие web-ресурсы студенческих конструкторских бюро, разработать единую информационную платформу, организовать хранение и доступ к информации о СКБ.

Проанализировав web-ресурсы, получили, что при поиске сведений о деятельности СКБ, возникают трудности, так как информация либо отсутствует, либо она неполная. Существующие СКБ НИУ «БелГУ» не имеют общей структуры, каждое является самостоятельной организацией, нет каких-то разработанных стандартов, общих для всех. Актуальность и практический аспект перечисленных проблем заключается в том, что не существует ресурса, который: объединял бы различные студенческие конструкторские бюро; предоставлял общие контакты, возможности всех СКБ; предоставлял легкий и общий доступ к информации о каждом СКБ; при этом уменьшил бы количество затрачиваемых ресурсов и облегчил их взаимодействие между собой.

При разработке единого информационного портала необходимо учесть, что СКБ в сети организуются тогда, когда членов бюро собирают в группу для реализации какой-то идеи через сайт. При разработке информационной системы, прежде всего, нужно обратить внимание на то, что посетители сайта могут интересоваться данной тематикой, но не иметь достаточной квалификации в области ИТ-технологий.

Использование методологии структурного анализа и проектирования SADT позволяет наглядно отобразить все процессы, возникающие при решении вопросов организации СКБ. Для анализа предметной области были применены нотации IDEF0 и IDEF3, которые позволили проанализировать протекающие процессы в СКБ, отобразить их взаимосвязи и спроектировать будущую структуру веб-портала СКБ НИУ «БелГУ».

Описание модели работы СКБ организовано в виде иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм, которые помогают отразить функциональную структуру в данной предметной области [3].

На рисунке 1 представлена контекстная диаграмма, демонстрирующая процесс предоставления и обработки информации на портале СКБ. На вход поступает информация о пользователе, его запрос (на вступление в одно из существующих СКБ, на получение различных прав, на получение оборудования), данные пользователя, а также ранее существующая база данных. Управляющими, регламентирующими и нормативными данными, которыми руководствуется работа портала, являются уровни доступа и законы РФ. Механизмами являются администратор портала и сам информационный портал. На выход поступает новое расписание оборудования, отчеты, обновлённая информация, все обновления фиксируются в базе данных.

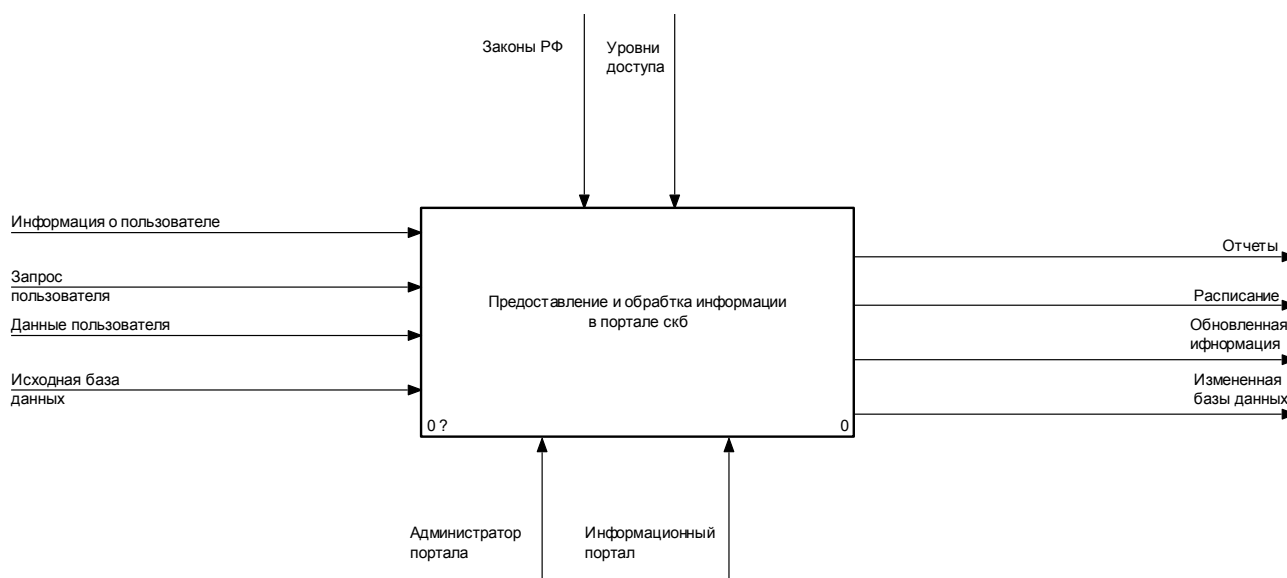


Рис. 1. Контекстная диаграмма «Предоставление и обработка информации в портале СКБ»
Fig. 1. Context diagram “Provision and processing of information in the SKB portal”

Декомпозиция контекстной диаграммы представляет собой разбиение на три основных процесса: авторизация пользователя, проверка запроса пользователя и изменение базы данных (рисунок 2).

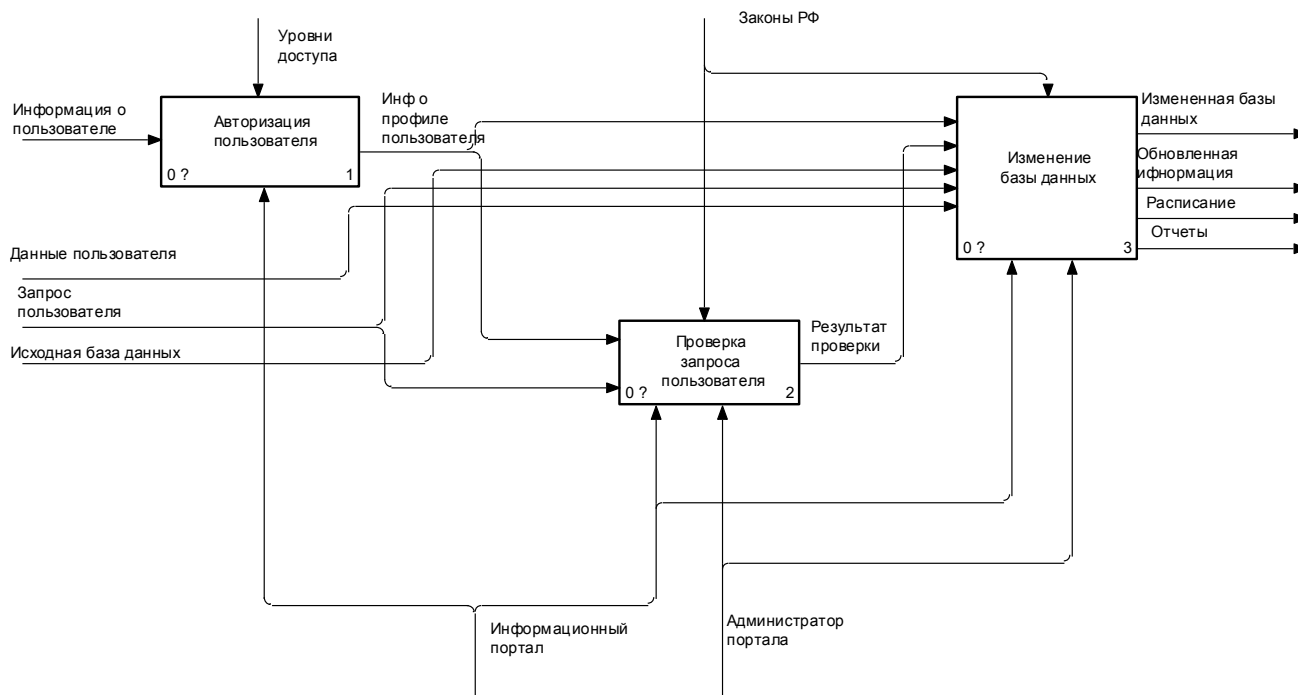


Рис. 2. Декомпозиция контекстной диаграммы
Fig. 2. The decomposition of the context diagram

Входными данными для блока «Авторизация пользователя» является информация о пользователе, выходными – информация о профиле пользователя, которая является входящими данными для блоков «Изменение базы данных» и «Проверка запроса пользователя».

Блок «Проверка запроса пользователя» на входе получает также запрос пользователя, тут происходит проверка пользователя, одобрение или отклонение заявки пользователя, выходными данными является результат проверки.

В блоке «Изменение базы данных» происходит изменение существующей базы данных на основе выходных данных: данные пользователя, информация о профиле пользователя, результат проверки, запрос пользователя и т.д. Выходными данными являются обновление информации на портале, изменённая база данных, расписание, и отчеты.

Декомпозиция информационной модели в нотации IDEF0, представленная на рисунке 3 показывает три основных процесса: авторизация пользователя, проверка запроса пользователя и изменение базы данных.

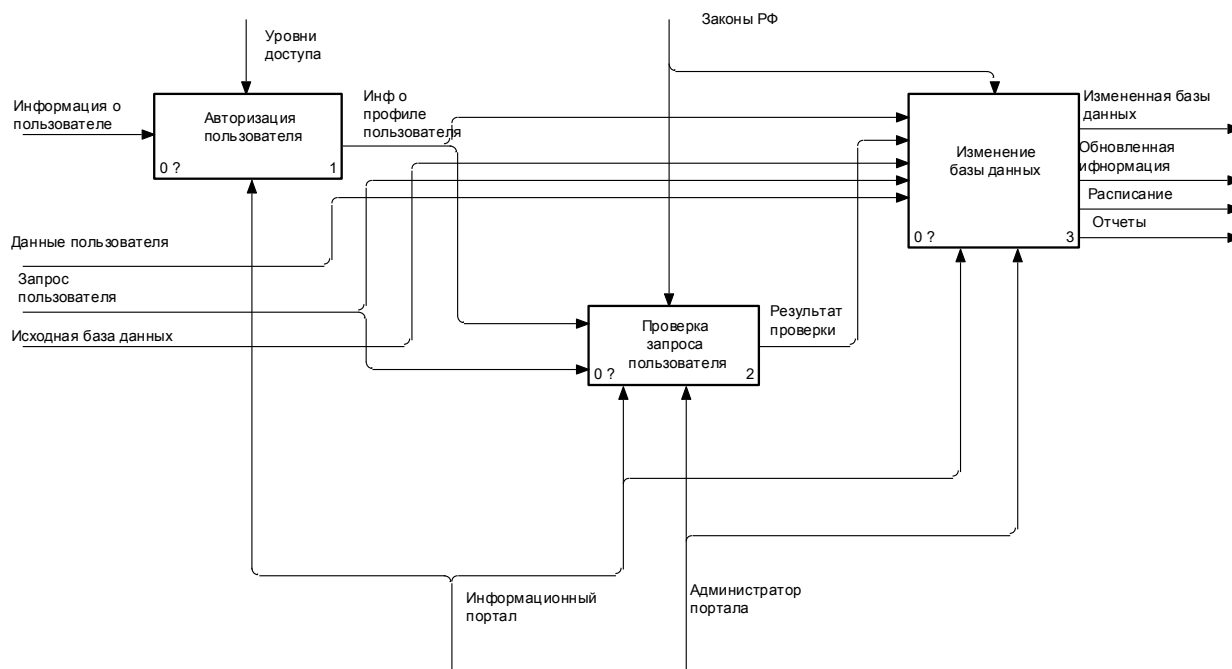


Рис. 3. Декомпозиция контекстной диаграммы
Fig. 3. Decomposition of the contextual diagram

В данном блоке происходит регистрация или авторизация пользователя, после определяется категория пользователя (студент, преподаватель), его полномочия (права на создания СКБ, обновления информации и т.д.), открывается доступ к portalу в соответствии с полномочиями.

Портал представляет не только информацию, но и позволяет распределить права доступа к данным: участие в СКБ, создание, администрирование (рисунок 4).

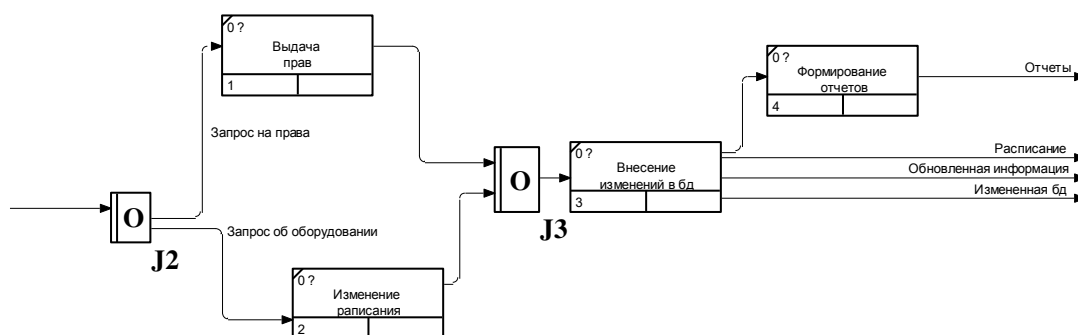


Рис. 4. Декомпозиция блока «Изменение базы данных»
Fig. 4. Decomposition of the “Change Database” block

В соответствии с рисунком база данных фиксирует изменение существующего расписания по займу оборудования, а также внесение соответствующих изменений в существующую базу данных, и дает возможность формировать различные отчеты, например, отчеты об участниках СКБ.

При поиске информации о студенческом конструкторском бюро НИУ «БелГУ» в сети Интернет, результаты которого представлены на рисунке 5, отсутствует единый источник информации, а если зайти на одну из предлагаемых ссылок поисковиком, то можно найти, лишь упоминание о том, что в университете такие структуры есть.

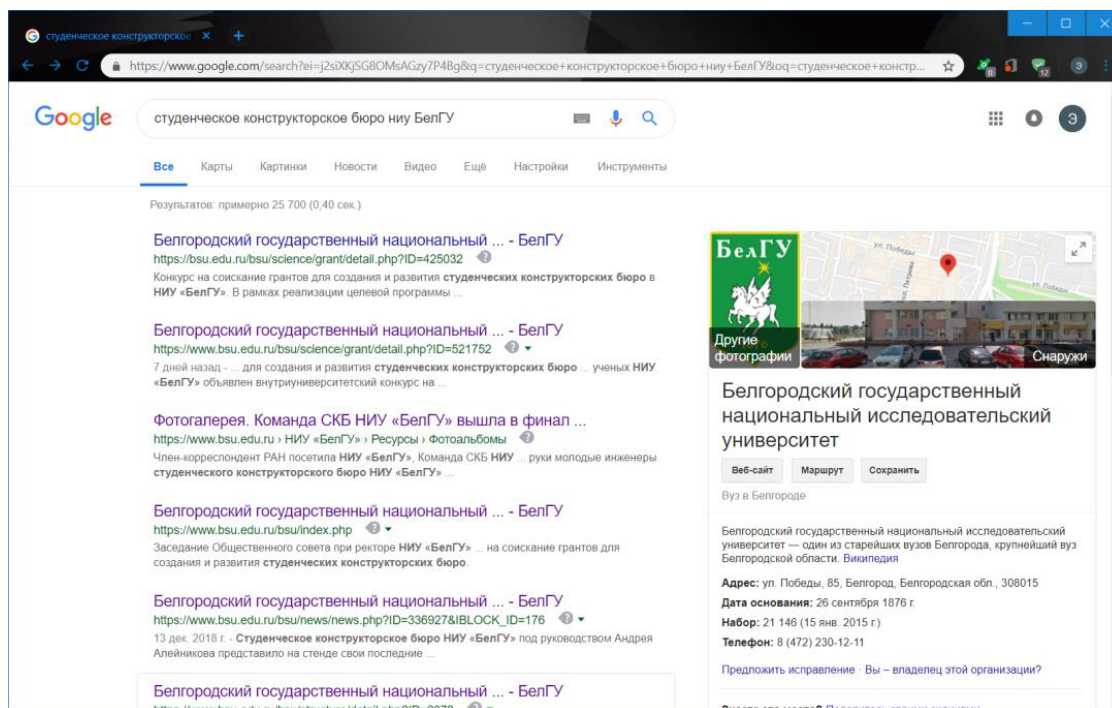


Рис. 5. Поиск информации о СКБ НИУ «БелГУ»

Fig. 5. Search for information about SKB NRU "BelSU"

Кроме того, на сайтах других СКБ [4, 5, 6], не связанных с Белгородом, имеется «скудный» результат, кроме того информационных ресурсов, связанных со студенческими бюро мало, а те, которые есть, имеют существенные недостатки, анализ которых показан в таблице.

Таблица

Анализ существующих сайтов СКБ

Название	Удобность	Возможность подачи электронного заявления на вступление	Наличие полной информации о деятельности	Быстрый поиск	Возможность вносить и редактировать информацию пользователю	Расписание
Технологический Университет (Москва)	+	-	-	-	-	-
СПБ Горный Университет	+	-	+	-	-	-
ЕГУ им. И.А. Бунина	-	-	+	-	-	-
ЮГУ	-	-	-	-	-	-

Как видно из таблицы, существующие ресурсы [4, 5, 6] очень ограниченные, как и в информационном плане, так и в функциональном.

На данный момент ведется разработка информационного портала, который будет содержать информацию о каждом СКБ, связанных с ним событиях, новостях, оборудовании, будет составлено расписание, личный кабинет пользователя, возможность подачи онлайн заявки на вступление, информация будет доступна для редактирования администраторами сайта и уполномоченными конкретными конструкторскими бюро, кроме того вся информация будет храниться в специальной базе данных.

Таким образом, создание единого информационного портала, поможет любому СКБ с легкостью разместить информацию о себе на сайте и оказаться в общем списке СКБ. Это позволит пользователям не только сократить время на поиски актуальной информации, но и увидеть полный спектр возможностей и информации о всех зарегистрированных СКБ.

Список литературы

1. Студенческое научное общество НИУ "БелГУ" (СНО НИУ "БелГУ") [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://sno.bsu.edu.ru/>.
2. Морозова С.А. Студенческое конструкторское бюро как условие подготовки конкурентоспособных специалистов / С.А. Морозова, Е.В. Журавлева // Профессиональное образование и рынок труда. 2016. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/studencheskoe-konstruktorskoe-byuro-kak-uslovie-podgotovki-konkurentosposobnyh-spetsialistov> (дата обращения: 22.05.2019).
3. Путивцева Н.П. О разработке автоматизированной системы выбора направления будущей профессиональной деятельности/ Н.П. Путивцева и др.//Научные ведомости БелГУ. Серия Экономика. Информатика. – Белгород: Изд-во БелГУ. – 2016. – В.39. – №16(237). – с. 138-146.
4. Московский Технологический Университет [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://unitech-mo.ru/science>
5. НИУ МЭИ [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://mpei.ru/Structure/Universe/avti/structure/cai/sdb>
6. СПб ГУ [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://spmi.ru/studenceskoe-konstruktorskoe-buro>

References

1. Student Scientific Society of National Research University "BelSU" (SSS NRU "BelSU") [Electronic resource]: – Access mode: <http://sno.bsu.edu.ru/>.
2. Morozova S.A. Student's design bureau as a condition for training competitive specialists / S.A. Morozova, E.V. Zhuravleva // Professional education and labor market. 2016. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/studencheskoe-konstruktorskoe-byuro-kak-uslovie-podgotovki-konkurentosposobnyh-spetsialistov> (appeal date: 05/22/2019).
3. Putivtseva N.P. On the development of an automated system for choosing the direction of future professional activity / N.P. Putivtseva et al / / Scientific statements BelSU. Economy series. Computer science. – Belgorod: Publishing house of BelSU. – 2016. – В.39. – №16 (237). – p. 138-146.
4. Moscow Technological University [Electronic resource]: – Access mode: <https://unitech-mo.ru/science>
5. NRU MEI [Electronic resource]: – Access mode: <https://mpei.ru/Structure/Universe/avti/structure/cai/sdb>
6. SPB GU [Electronic resource]: – Access mode: <https://spmi.ru/studenceskoe-konstruktorskoe-buro>

Рыженко Наталия Олеговна, студентка 4 курса НИУ «БелГУ»

Сторожко Ольга Андреевна, студентка 4 курса НИУ «БелГУ»

Нестерова Елена Викторовна, кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры информационных и робототехнических систем

Игрунова Светлана Васильевна, кандидат социологических наук, доцент, доцент кафедра информационных и робототехнических систем, НИУ «БелГУ»

Игрунов Константин Константинович, аспирант НИУ «БелГУ»

Ryzhenko Natalia Olegovna, 4th year student, National research university "BelSU"

Storozhko Olga Andreevna, 4th year student, National research university "BelSU"

Nesterova Elena Viktorovna, candidate of economics sciences, senior lecturer, department of information and robotic systems NRU «BelSU»

Igrunova Svetlana Vasilievna, candidate of sociological sciences, docent, professor department of information and robotic systems, NRU «BelSU»

Igrunov Konstantin Konstantinovich, postgraduate student, NRU «BelSU»

УДК 004.94; 658.5

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-4

**Егоров И.А.
Жихарев А.Г.
Маторин С.И.****К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНЫХ
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы д. 85, г. Белгород, 308015, Россия*e-mail: egorov.ilya.alex@mail.ru, zhikharev@bsu.edu.ru, matorin@bsu.edu.ru***Аннотация**

Актуальность оптимизации системно-объектных имитационных моделей сводится к использованию имитационного моделирования для решения практических задач. Оптимизация активно применяется в имитационном моделировании для построения высококачественных моделей. Существующие технологии оптимизации моделируемых процессов, внедренные в программные средства, постоянно совершенствуются. Таким образом, тема разработки систем оптимизации остается открытой. В основе проводимых исследований лежит системно-объектный подход «Узел-Функция-Объект», алгоритмы сортировки массивов, а также методы оптимизации линейного программирования. В работе рассматривается вопрос классификации задач оптимизации согласно основным элементам, из которых состоит имитационная системно-объектная модель: узел, функцию, объект (УФО). Приведены описания и примеры моделей, в которых раскрывается смысл поставленных задач. В заключении авторы приходят к выводу, что оптимизация системно-объектных моделей должна проводиться согласно трём основным компонентам подхода «Узел-Функция-Объект». Дальнейшая классификация методов оптимизации должна проводиться в соответствии с выделенными компонентами.

Ключевые слова: «Узел-Функция-Объект»; имитационное моделирование; оптимизация; мера системности.

UDC 004.94; 658.5

**Egorov I.A.
Zhikharev A.G.
Matorin S.I.****TO THE QUESTION OF OPTIMIZATION OF SYSTEM-OBJECT
IMITATION MODELS**

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

*e-mail: egorov.ilya.alex@mail.ru, zhikharev@bsu.edu.ru, matorin@bsu.edu.ru***Abstract**

The relevance of optimization of system-object simulation models is reduced to use of simulation to solve practical problems. Optimization is actively used in simulation modeling to build high-quality models. The existing technologies of optimization of simulated processes, implemented in software, are constantly improving. Thus, the topic of optimization systems development remains open. The basis of the research is the system-object approach «Node-Function-Object», algorithms for sorting arrays, as well as methods for optimizing linear programming. The problem of classification of optimization problems is considered in accordance with the main elements of which the simulation system-object model consists: a node, a function, an object (UFO). Descriptions are given and examples of models in which the meaning of the tasks is revealed. In conclusion, the authors conclude that the optimization of system-object models should be carried out according to the three main components of the «Node-

Function-Object» approach. Further classification of optimization methods should be carried out in accordance with the selected components.

Keywords: «Node-Function-Object»; imitation modeling; optimization; systemic measure.

ВВЕДЕНИЕ

Имитационное моделирование может быть применено для решения задач оптимизации. В основе положений СОМПЗ [4, с. 106] лежит оригинальный системно-объектный подход «Узел-Функция-Объект». Следовательно, системно-объектные модели могут быть оптимизированы по трем признакам: с точки зрения целостности систем и подсистем (узловая оптимизация); эффективность работы метода отдельно взятого объекта (функциональная оптимизация); оптимальные значения количественных показателей свойств объектов (объектная оптимизация). Далее приведена более подробная классификация приведенных выше признаков.

УЗЛОВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Узловой оптимизацией называется изменение сопряжения двух узлов потоковыми объектами. Говоря про случай узловой оптимизации, необходимо задействовать термин меры системности, который вводится для оценки соответствия подсистем требованиям надсистемы [5, с. 1814].



Рис. 1. Пример узловой оптимизации
Fig. 1. An example of a nodal optimization

Представим следующий пример в среде имитационного моделирования UFOModeler [6, с. 31365]. Например, связь 2 между узлом 1 и узлом 2 является не в полной мере корректной, то есть в контексте рассматриваемой подсистемы наличие связи 2 не обеспечивает высокий коэффициент системности. Необходимо найти такой узел 3, который при соединении его с узлом 1 через связь 3 сможет повысить коэффициент системности, приблизив его к единице (рис. 1).

Таким образом, структура рассматриваемой подсистемы модели станет оптимизирована с точки зрения взаимосвязи узлов.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Функциональная оптимизация – выборочная замена метода объекта фрагментом кода, решающим аналогичную задачу. Эффективность изменения алгоритма будем оценивать по скорости, требуемой на исполнение метода.

Например, узел 1 сортирует массив из одинакового количества элементов и использует метод «пузырьковой сортировки» [2, с. 320] его алгоритмическая скорость в среднем составляет

« $O(n^2)$ », известно, что, метод «быстрой сортировки» [3, с. 643] имеет среднюю скорость сортировки « $O(n \log n)$ ».

Используем среду имитационного моделирования UFOModeler. Опишем алгоритмы сортировок на специально разработанном языке среды в узлах с именами алгоритмов, при этом в качестве входных данных зададим массив с одинаковой размерностью из тысячи элементов (рис. 2).

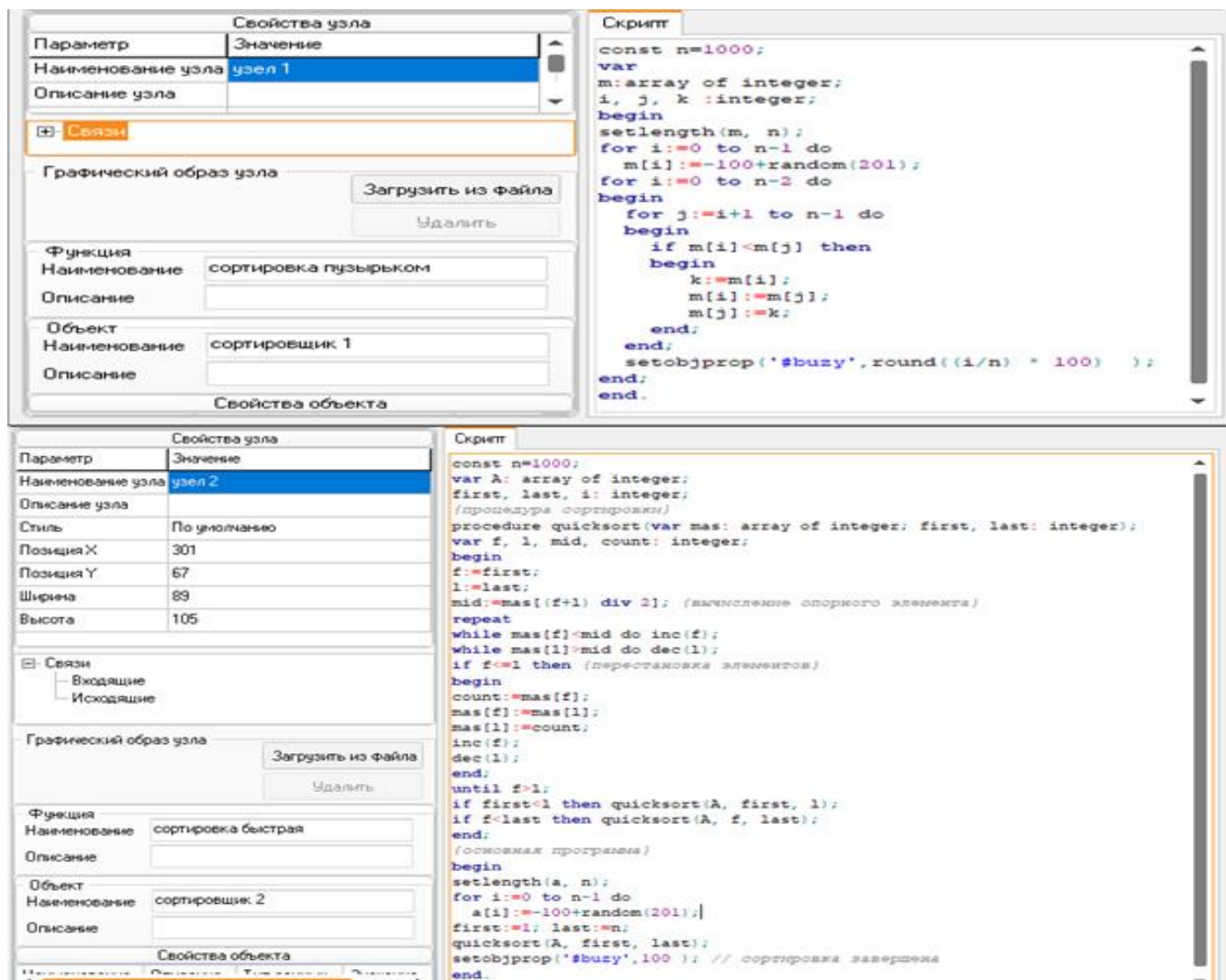


Рис. 2. Программный код узловых методов сортировок

Fig. 2. Code nodal methods sorts

Приведем на выполнение модель, состоящую из двух узлов, индикаторные полосы отражают процесс выполнения сортировки двумя разными алгоритмами (рис. 3).



Рис. 3. Выполнение сортировки массивов
Fig. 3. Perform array sorting

Полностью заполненная красная полоса означает завершение процесса сортировки. Таким образом, функциональная оптимизация будет осуществляться через замену метода «пузырьковой сортировки» на метод «быстрой сортировки», что существенно повысит скорость выполнения поставленной перед узлом задачи.

ОБЪЕКТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Объектная оптимизация – получение оптимальных значений выходных данных (или свойств объекта). Такую оптимизацию еще можно назвать ресурсной. Как правило, в этом случае нам необходимо воспользоваться специальным узлом, содержащим метод, который преобразует входные параметры для получения оптимального значения искомым свойств объектов. Подобные задачи описываются в математической дисциплине линейное программирование [1, с. 120].

Для примера приведем решение задачи через создание модели в среде UFOModeler. Предприятие получает прибыль от производства двух изделий, прибыль от продажи одного изделия 1 составляет сорок пять у.е., прибыль от продажи одного изделия 2 составляет восемьдесят у.е., связь «общий ресурс 1» содержит количественный параметр равный четыреста единиц, а связь «общий ресурс 2» содержит количественный параметр равный четыреста пятьдесят единиц. Оба ресурса одновременно являются составляющими для двух разных изделий. В каком количестве необходимо выпустить изделий 1 и изделий 2, чтобы получить максимальную прибыль (рис. 4).

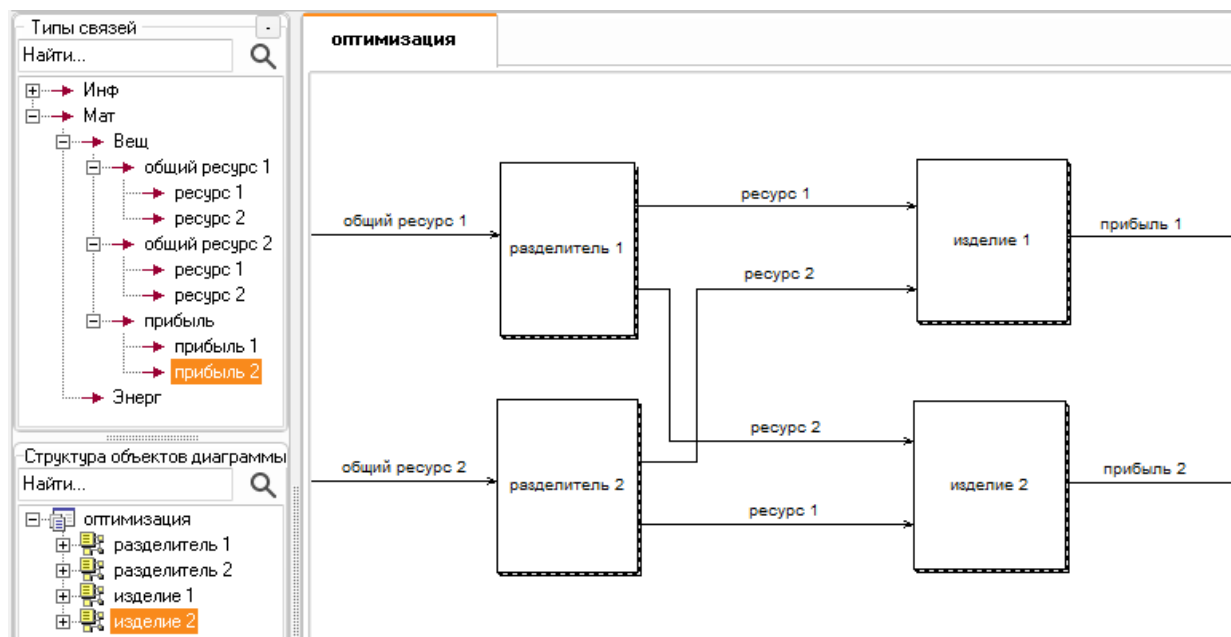


Рис. 4. Системно-объектная модель производственного предприятия
Fig. 4. System-object model of production enterprise

Изначально модель построена так, что изделия двух видов будут выпускаться одновременно до тех пор, пока хватает ресурсов на производство еще одной единицы продукции каждого вида. С помощью узла «симплекс-метод» найдем решение поставленной задачи для нахождения максимальной прибыли, при этом модель примет следующий вид (рис. 5).

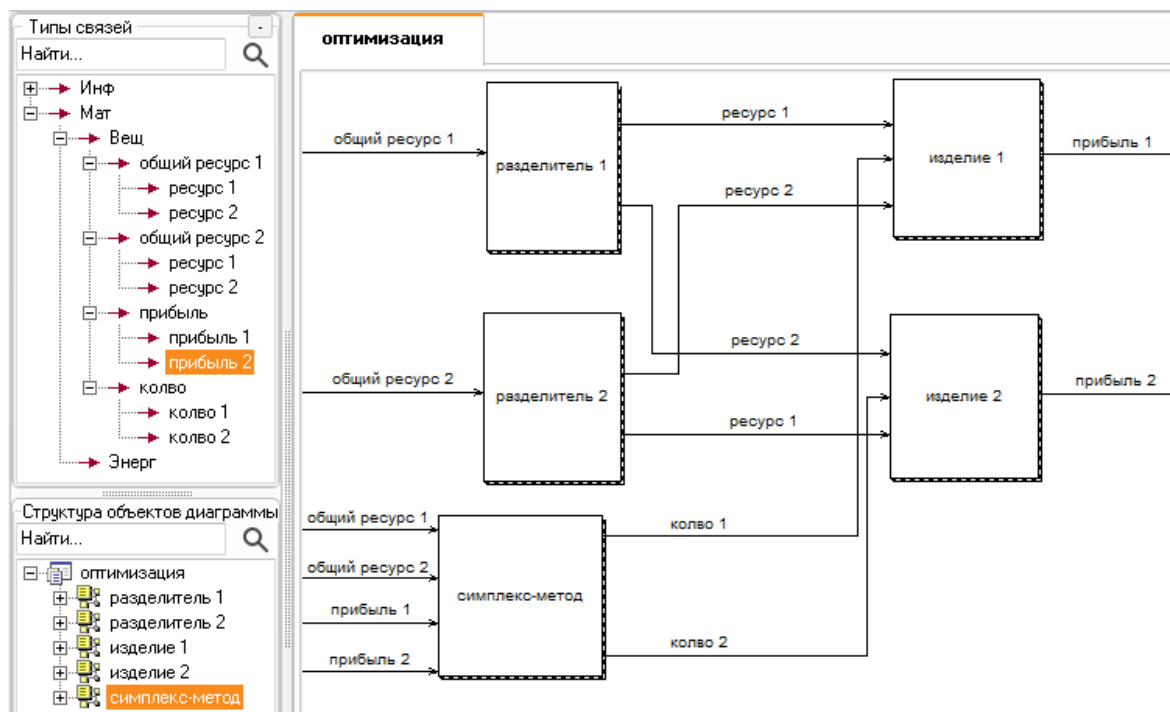


Рис. 5. Модифицированная системно-объектная модель
Fig. 5. Modified system-object model

Алгоритм узла «симплекс-метод» осуществит нахождение оптимального количества изделий двух видов с учетом существующих ресурсов. В данной задаче изделий первого вида необходимо

выпустить в количестве двадцати четырех штук, а второго – четырнадцать штук, при этом оптимальные значения будут записаны в свойство объекта «необх_колво» для изделия 1 и изделия 2. Объектная оптимизация модели привела к увеличению прибыли предприятия до двух тысяч двести у.е.

Таким образом, применение дополнительных узловых объектов и перераспределение ресурсов с помощью симплекс метода повлияло на увеличение прибыли, что являлось целевой функцией задачи объектной оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для каждого компонента подхода «Узел-Функция-Объект» применяется специальный метод оптимизации в системно-объектных моделях. Применение оптимизации позволяет составить более точную модель с точки зрения системности, более быстродействующую модель с функциональной точки зрения, а также провести объектную оптимизацию с целью повышения эффективности процессов, представленных в модели.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов Российского фонда фундаментальных исследований № № 18-07-00355, 19-07-00290, 19-07-00111.

Список литературы

1. Балдин, К.В. Математическое программирование: Учебник / К.В. Балдин, Н.А. Брызгалов, А.В. Рукусуев / Под общ. ред. д.э.н., проф. К.В. Балдина. – 2-е изд. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2013. – 220 с.
2. Кнут, Д.Э. Искусство программирования. Т. 1. Основные алгоритмы. / Д.Э. Кнут. – М.: Вильямс, 2016. – 720 с.
3. Кнут, Д.Э. Искусство программирования. Т. 3. Сортировка и поиск. / Д.Э. Кнут. – М.: Вильямс, 2014. – 832 с.
4. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. Исчисление объектов в системно-объектном методе представления знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. – М.: Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН – 2017. – №3. – С. 104-115
5. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Kuznetsov, A.V., Zherebtsov, S.V., Tchekanov, N.A. To The Problem of the Coefficient Calculus of the Nodal Object in the System-Object Models // Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems, Vol. 10, 10-Special Issue, 2018. – P. 1813-1817
6. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object // International Journal of Applied Engineering Research, 10(12), 2015. – P. 31363-31370

References

1. Baldin, K.V. Mathematical programming: textbook / K.V. Baldin, N.A. Bryzgalov, A.V. Rukosuev / Edited by doctor of Economics, Professor K. V. Baldin. – 2nd ed. – M.: Publishing and trading Corporation «Dashkov & Co», 2013. – 220 p.
2. Knuth, D. E. The Art of Computer Programming. V. 1. Fundamental Algorithms. / D. E. Knuth. – M.: Viliams, 2016. – 720 p.
3. Knuth, D. E. The Art of Computer Programming. V. 3. Sorting and searching. / D. E. Knuth. – M.: Viliams, 2014. – 832 p.
4. Matorin S.I., Zhikharev, A.G., Zimovets O.A. The calculus of objects in the system-object method of knowledge representation // Scientific and Technical Information Processing. – M.: Federal research center «Informatics and management» RAS – 2017. – №3. – P. 104-115
5. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Kuznetsov, A.V., Zherebtsov, S.V., Tchekanov, N.A. To The Problem of the Coefficient Calculus of the Nodal Object in the System-Object Models // Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems, Vol. 10, 10-Special Issue, 2018. – P. 1813-1817

6. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object // International Journal of Applied Engineering Research, 10(12), 2015. – P. 31363-31370

Егоров Илья Александрович, аспирант кафедры прикладной информатики и информационных технологий

Жихарев Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем

Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и робототехнических систем

Egorov Ilya Alexandrovich, postgraduate student at the Department of Applied Informatics and Information Technologies

Zhikharev Alexander Gennadievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Robotics Systems

Matorin Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Robotics Systems

УДК 004.9

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-5

Михелев В.М.¹

Мирошниченко А.С.²

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ПАТОЛОГИЙ
ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА НА СНИМКАХ МРТ**

¹) Белгородский государственный технологический университет, ул. Костюкова д. 46, г. Белгород, 308012, Россия

²) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: 963565@bsu.edu.ru, mikhelev@bsu.edu.ru

Аннотация

В статье рассмотрены методы классификации снимков МРТ головного мозга человека. Методы представляют собой обучаемые бинарные классификаторы, для определения наличия или отсутствия высокой стадии патологий головного мозга. Исследование направлено на выявление лучшего метода классификации на обработанном наборе данных BRATS. В работе выполнен анализ трех методов классификации: классификация изображений по базовым примитивам контура, метод на основе сверточной нейронной сети, с бинарным классификатором и метод классификации на основе сверточной предобученной нейронной сети Xception. В работе показано, что использование предобученных нейронных сверточных сетей позволяет сократить время расчета времени и ресурсы вычислительной системы на обучение нейронной сети. Приведены результаты вычислительного эксперимента и показано что наилучшая точность при решении задачи классификации патологий головного мозга человека на снимках МРТ достигается при использовании нейронной сверточной предобученной нейронной сети Xception.

Ключевые слова: методы классификации изображений; снимки МРТ; нейронные сети; сверточные сети.

UDC 004.9

Mikhelev V.M.¹

Miroshnichenko A.S.²

**THE DECISION OF THE TASK OF CLASSIFICATION OF HUMAN
BRAIN PATHOLOGIES ON MRI IMAGES**

¹) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia

²) Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: 963565@bsu.edu.ru, mikhelev@bsu.edu.ru

Abstract

The article discusses the methods of classification of MRI images of the human brain. The methods are trained binary classifiers to determine the presence or absence of a high stage of brain pathologies. The study aims to identify the best classification method on the processed BRATS data set. We analyzed three classification methods: image classification by basic contour primitives, a method based on a convolutional neural network, with a binary classifier, and a classification method based on a convolutional pretrained neural network Xception. The paper shows that the use of pre-trained neural convolutional networks allows to reduce the time for calculating the time and resources of a computer system for training a neural network. The results of a computational experiment are presented and it is shown that the best accuracy in solving the problem of pathology classification in MRI scans of the human brain is achieved using the Xception neural convolutional pre-trained neural network.

Keywords: image classification methods; MRI scans; neural networks; convolutional networks.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время онкологические заболевания головного мозга являются очень серьезным и опасным заболеванием среди детей и взрослых. По статистическим данным

Всемирной организации здравоохранения показано, что каждый год от онкологических заболеваний в мире умирает более 7,5 млн. человек [1]. Одним из общепринятых методов обнаружения различных патологий является магниторезонансная томография (МРТ) [5], которая позволяет получить детальное изображение различных тканей. Анализ полученных изображений МРТ обычно проводится вручную, этот процесс является трудоемким и сложным. Он требует выполнения следующих задач: поиск и распознавание определённых объектов, выделение и сегментирование этих объектов на снимках МРТ.

На рисунке 1 представлен пример медицинского снимка после работы аппарата МРТ [4]. Этот снимок здорового человека, на котором не видно патологий и других элементов, отражающих «нездоровые» изменения.

Важно отметить, что для диагностирования патологий головного мозга требуются высокие навыки точности и опыта в анализе снимков МРТ [12, 13]. В виду человеческого фактора зачастую бывают моменты, когда специалист не выявляет мельчайшие изменения, что в очередной раз доказывает необходимость разработки дополнительных инструментариев для диагностирования и анализа снимков МРТ [19].

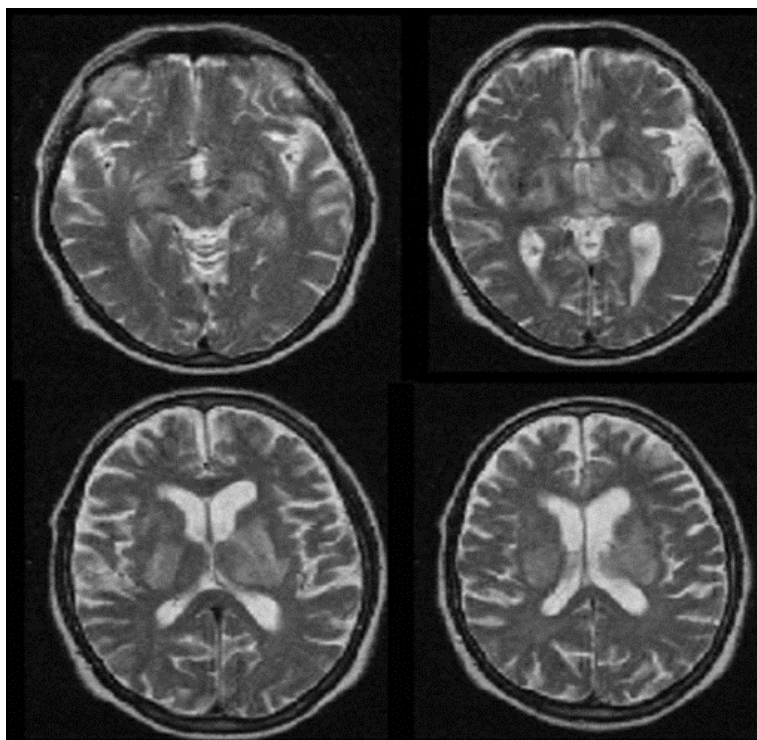


Рис. 1. Снимок МРТ головного мозга человека
Fig. 1. MRI scan of the human brain

Целью данного исследования является анализ существующих методов решения рассмотренной выше задачи и выбор лучшего из них [20]. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: сформировать один набор данных для всех методов, классифицировать эти данные различными методами и провести сравнительный анализ полученных результатов.

ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДУЕМОЙ ОБЛАСТИ

Типичные глубокие нейронные сети классификаторы, такие как AlexNet [16, 17], VGGNet [18] или GoogLeNet [15], считывают изображение и выводят набор вероятностей класса относительно всего изображения. Это делается путем предоставления необработанного

изображения в качестве входа в первый уровень сети и выполнение «переднего прохода»: последовательно позволяя каждому слою вычислить свою соответствующую функцию на выходе слоя, который ему предшествовал.

Примером для проверки правильности классификации является распознавание рукописной цифры, где нейронная сеть получает изображение одной рукописной цифры и должна решить, какая из десяти цифр представлена на изображении. Задача сегментации требует решения классификации для каждого отдельного пикселя исходного изображения [14]. Поэтому эта цель может быть решена путем применения классификатора к исправлениям ввода изображения в режиме скользящего окна. В этой схеме каждый пиксель классифицируется путем извлечения патча (матрица пикселей, где центральный пиксель входной) вокруг него и классифицирования его по нейронной сети. Несколько пикселей можно классифицировать сразу, для этого необходимо обрабатывать несколько перекрывающихся патчей как пакет, и выполнять распараллеливание переднего прохода каждого патча через сеть. Однако, соседние пиксели в изображении могут быть близки по своим характеристикам (похожи по подобию), поэтому этот подход к решению задачи характеризуется избыточными вычислениями.

ОПИСАНИЕ ДАТАСЕТА И ИССЛЕДУЕМЫХ МЕТОДОВ

В качестве входных данных выступают медицинские снимки МРТ головного мозга датасета BRATS, возможные виды которых приведены на рисунках 2 и 3. Датасет был предоставлен «Center for Biomedical Image Computing and Analytics University of Pennsylvania, Philadelphia PA, USA».

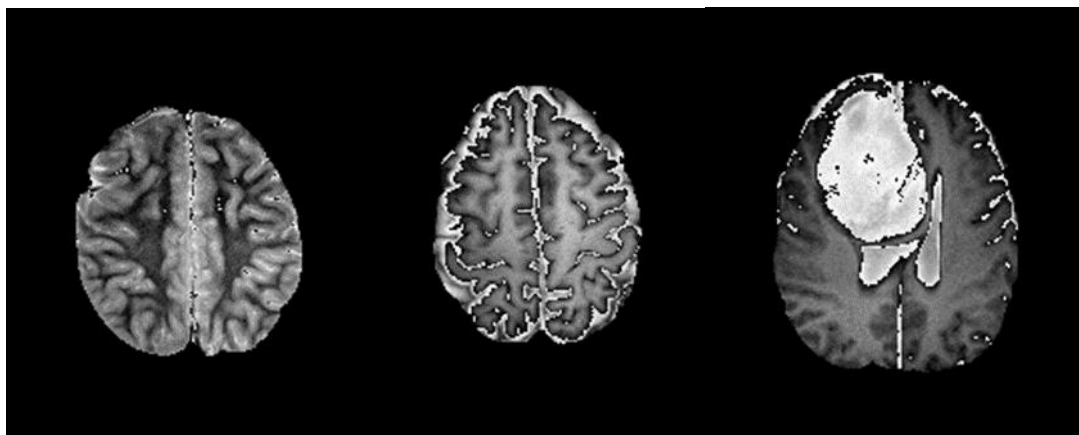


Рис. 2. Изображения срезов по оси X
Fig. 2. Images of slices along the X axis

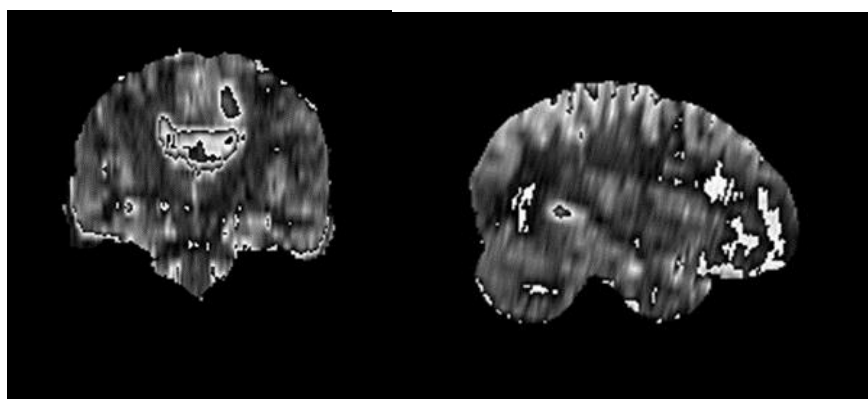


Рис. 3. Изображения срезов по оси Y и Z
Fig. 3. Images of slices along the Y and Z axis

Датасет BRATS содержит снимки МРТ головного мозга человека в формате медицинского изображения *.mha, имеет обучающую и тестовую выборки. Каждый *.mha файл представлен в виде куба, плоскости которого являются срезом (снимок за такт работы аппарата МРТ).

Исследуемые методы применяют в качестве входных данных растровые изображения, таким образом для формирования общего набора данных, необходимо произвести предварительную обработку датасета BRATS.

Алгоритм предварительной подготовки общего набора данных для исследования:

1. Для каждого *.mha файла выгружаем срезы и представляем их в 8 битном одноканальном формате растрового изображения
2. Приводим каждое изображение к одному размеру 299×299 px
3. Сохраняем все срезы со всех осей X, Y, Z каждого файла *.mha

После предварительной подготовки набора данных, получаем набор из срезов по трем осям каждого *.mha файла.

В результате обработки датасета BRATS сформированная выборка (обучающая и тестовая) составила 520000 изображений.

ПЕРВЫЙ МЕТОД – КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО БАЗОВЫМ ПРИМИТИВАМ КОНТУРА [2]

1. На вход алгоритма поступает изображение (рис.4 левый). С помощью функции `canny()` OpenCV [2] строим контур изображения (рис.4 правый).

2. Для построения графа основной идеей является метод, описанный в статье [3]. Основное отличие данного метода заключается в том, что при формировании графа используются контуры изображений, следовательно, значение цвета пикселя для дальнейшей работы не является определяющим.

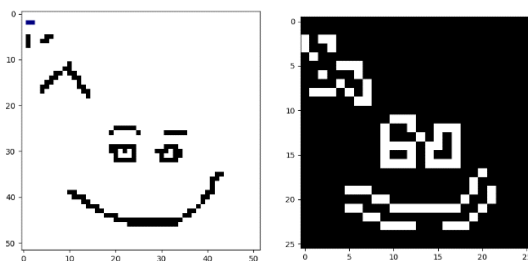


Рис. 4. Исходное изображение и построенный контур
Fig. 4. Input image and built contour

3. После сформированного контура изображения необходимо пройти по всему контуру и выявить «значимые точки» вершины и присвоить им вес значимости.

4. Вес присваивается следующим образом, чем больше точек контура находится в ближайшей окрестности, тем выше вес, т.е. своего рода задача кластеризации.

5. Далее производим аппроксимацию вершин графа для отображения более значимых вершин. Аппроксимация производится по весу вершин с определенным порогом.

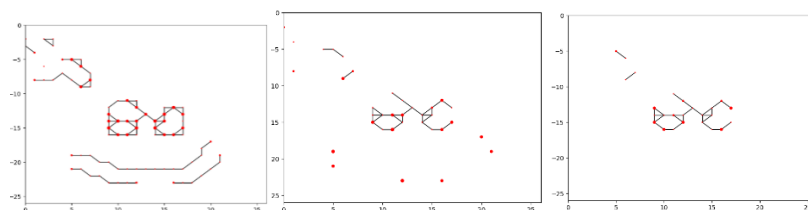


Рис. 5. Аппроксимация вершин с различным порогом
Fig. 5. Approximation of vertices with different thresholds

При использовании изображений с малым разрешением около 100x100 px алгоритм работает достаточно быстро, но как только размер изображения превышает 600x600 px алгоритм обрабатывает информацию на порядок дольше. Отсюда следует, что необходимо ускорить процесс формирования вершин графа и определения веса вершин. Для решения данной задачи было принято решение использовать технологию параллельного программирования CUDA, как одно из самых эффективных. Для изображения размером fullHD 1920x1080 время обработки данных сократилось с 325 секунд до 11.5 секунд.

6. Шаги 1-5 применяются не для всего изображения, а для сегментированных «кусков», приблизительным размеров 5x5 px (выбран эмпирическим методом). Похожий алгоритм сегментации описан в работе [4]. В результате использования сегментированных изображений, на каждом выходном изображении получаем несколько простых графов (они же примитивы, рис. 6).

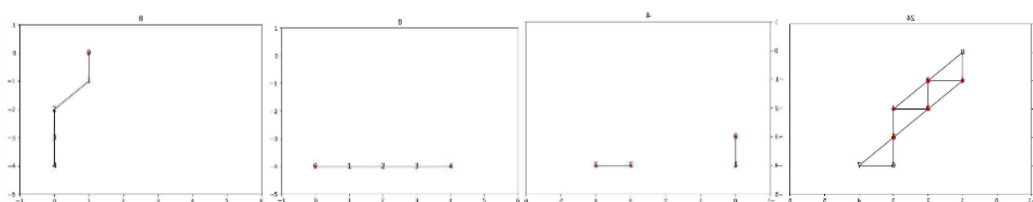


Рис. 6. Базовые примитивы
Fig. 6. Basic lines

7. Полученные «простые графы» аналитическим путем описываем для представления в виде математических функций. После этого производится классификация базовых примитивов с последующей записью в вектор. Важное замечание: данные примитивы выполняют роль признаков изображений, которые в дальнейшем можно использовать для задач классификации и распознавания, это очень похоже на определённые признаки в нейронных сетях (см. рис. 7).

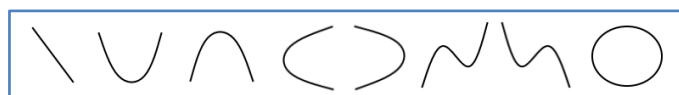


Рис. 7. Все базовые примитивы
Fig. 7. All types of basic lines

ВТОРОЙ ИССЛЕДУЕМЫЙ МЕТОД – МЕТОД НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ, С БИНАРНЫМ КЛАССИФИКАТОРОМ [3].

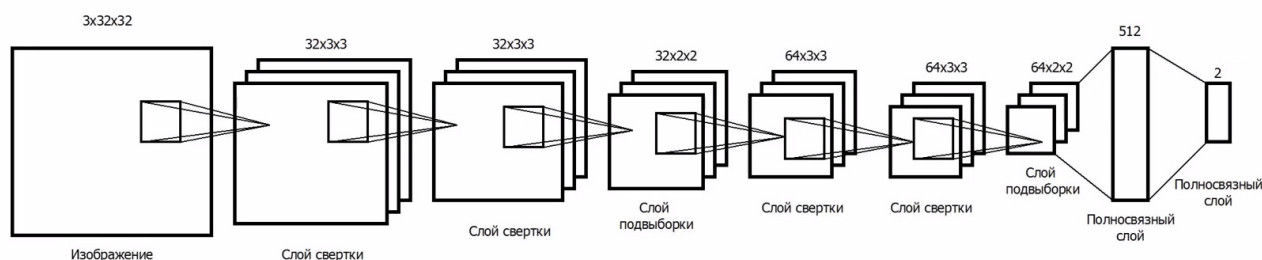


Рис. 8. Схема сверточной сети предлагаемого метода распознавания объектов на снимках МРТ
Fig. 8. Scheme of the convolutional network of the proposed method of object recognition in MRI images

Данная структура сети имеет 4 слоя свертки, 2 слоя под выборки и 1 полно связный слой. Предлагаемый метод решает простую задачу классификации, он разделит данные на класс наличия проблем и класс отсутствия проблем, это разделение позволит быстро определить наличие патологий у человека по снимкам МРТ. Так же данную структуру можно использовать с применением метода обучения с подкреплением, что позволит расширить базу снимков и снизить погрешность определения класса [6, 7].

На вход сети поступает изображение (для примера 32×32) определенного размера, после чего производится свертка дважды с ядром 5×5, после этого выделяется слой под выборки и также производится свертка дважды с другим ядром для выделения признаков изображения [8, 9]. После выделения еще одного слоя под выборки добавляется полно связный слой и «результатирующий».

ТРЕТИЙ ИССЛЕДУЕМЫЙ МЕТОД – СВЕРТОЧНАЯ ПРЕДОБУЧЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ XCEPTION

Сеть Xception можно считать модифицированной Inception V3 [4].

Данные сначала проходят через входной поток, затем через средний поток, который повторяется восемь раз и, наконец, через выходной поток [10, 11]. Все слои Convolution и SeparableConvolution сопровождаются пакетной нормализацией (не включены в диаграмму), кроме того, слой SeparableConvolution использует множитель глубины 1 (без увеличения глубины).

Модель Xception с глубиной 126 слоя и 22.9 млн параметрами.

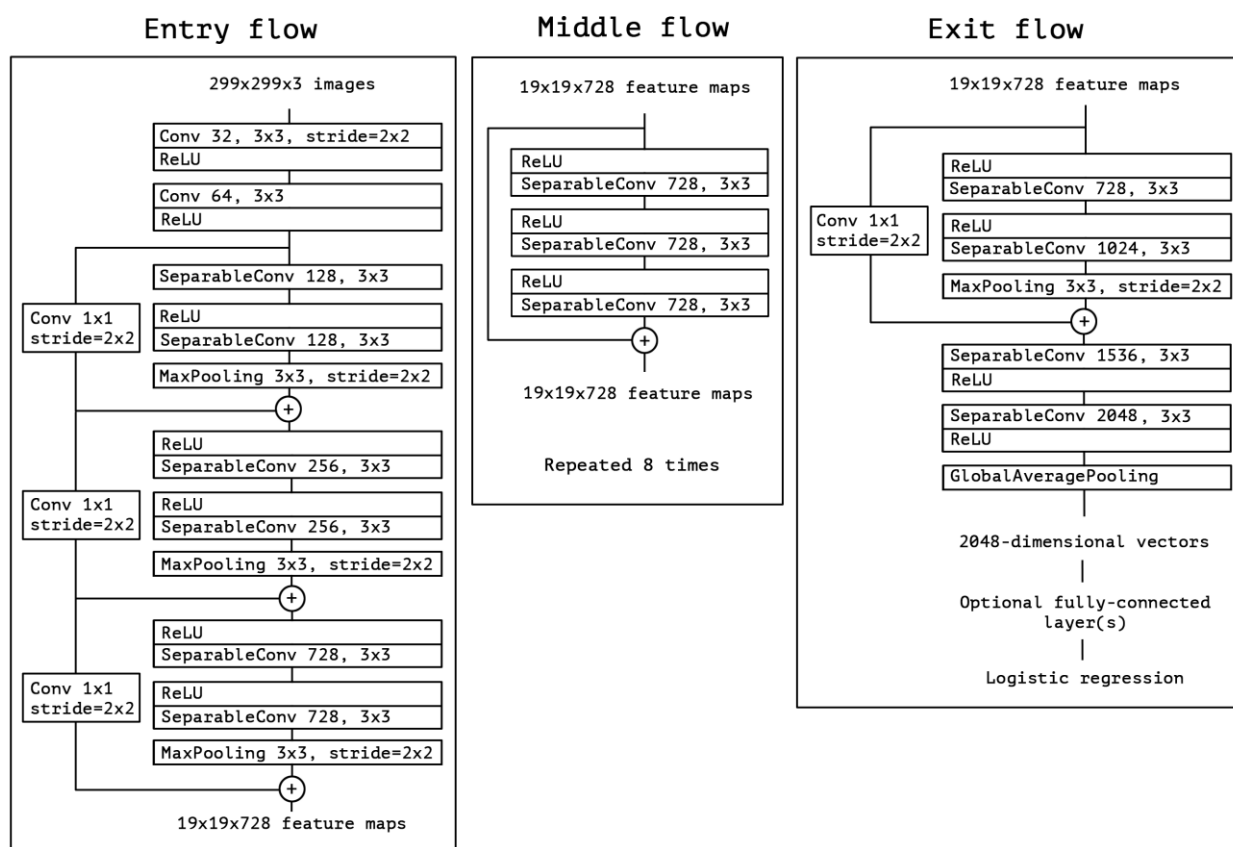


Рис.9. Структура сверточной нейронной сети Xception
Fig. 9. The structure of the convolutional neural network Xception

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Тестирование методов проводилось на одном наборе данных, а также на одном тестовом стенде. Важно отметить, что временные затраты на обучение зависят от аппаратного обеспечения.

Параметры стенда:

Nvidia GTX960 4GB Asus Strix + Intel Core i5 6600k + 16GB RAM

На рисунке 9 представлен пример классифицируемого снимка и результат классификации. Как видно по работе метода ответ «Prediction: True» что означает присутствие патологии на снимке.



Рис. 9. Пример загрузки снимка и вывода результата классификации изображения
Fig. 9. Example of loading a snapshot and displaying the result of image classification

Сравнение методов

Таблица

Table

Comparison of methods

Метод	Время на обучение мин.	Точность %
Базовые линии контура	10	63,7
CNN 2018	25	78
CNN 2019	15	91, 5

Исходя из данных, полученных в результате тестирования рассмотренных методов, алгоритм CNN 2019, основанный на использовании предобученной сверточной сети, лучше всего подходит для решения задачи классификации снимков МРТ головного мозга с использованием датасета BRATS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ использования трех методов классификации патологий на снимках МРТ головного мозга человека. Это метод классификация изображений по базовым примитивам контура, метод на основе сверточной нейронной сети с бинарным классификатором и метод классификации на основе сверточной предобученной нейронной сети Xception. Приведенные результаты вычислительного эксперимента показали, что наилучшая точность при решении задачи классификации патологий достигается при использовании нейронной сверточной предобученной нейронной сети Xception. Максимальная точность классификатора составила 91.4% на сформированной тестовой выборке.

Приведенные результаты доказывает необходимость и возможность разработки дополнительных программных средств для диагностирования и анализа снимков МРТ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-07-00133_А.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения, Международное агентство по изучению рака/ПРЕСС-РЕЛИЗ № 223 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://globocan.iarc.fr/Default.aspx>.
2. Мирошниченко А.С., Михелев В.М, Коняева Е.С. – «Метод классификации изображений» // XIX Международная конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии» (IPMT-2019) и X школы-конференции «Информатика в образовании» (INED-2019), 14-15 февраля, г. Воронеж.
3. Мирошниченко А.С., Михелев В.М. – «Метод распознавания объектов на снимках МРТ на основе сверточной нейронной сети» // XVIII International Conference «Computer Science: problems, methodology, technologies» (IPMT-2018)» and IX school–conference on Computer Science For Education» (INED-2018), 8-9 февраля, г. Воронеж.
4. Снимок МРТ головного мозга человека [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eegeasy.com/articles/detail.php?ELEMENT_ID=26.
5. Современные виды томографии. Учебное пособие/ М.Я. Марусина, А.О. Казначеева. – СПб.: СПбГУ ИТМО., 2006. – 152 с.
6. Francois Chollet, Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions.2017, arXiv:1610.02357v3 [cs.CV].
7. K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Deep residual learning for image recognition. 2015, arXiv:1512.03385v1 [cs.CV].
8. K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification. 2015, arXiv:1502.01852v1 [cs.CV].
9. S. Ioffe and C. Szegedy. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. 2015, arXiv:1502.03167v3 [cs. LG].
10. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In NIPS, 2012.
11. Min Lin, Qiang Chen, and Shuicheng Yan. Network in network. CoRR, abs/1312.4400, 2013.
12. Manoj, L.L. Brain Tumor Detection and Segmentation Using Histogram Thresholding/ K.K. Manoj, Y.K. Soubrabh// International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2012. – Vol. 1. – Issue 04. – P. 16-20.
13. Mansfield, P. NMR Imaging in Biomedicine: Supplement 2 Advances in Magnetic Resonance/ P. Mansfield, P.G. Morris. – New York: Academic press, 1982. – 365 P.
14. Neeraj, S. Automated medical image segmentation techniques/ S. Neeraj, L.M. Aggarwal // Journal of medical physics. – 2010. – Vol. 35. – PP. 3-14.
15. Sanjeev Arora, Aditya Bhaskara, Rong Ge, and Tengyu Ma. Provable bounds for learning some deep representations. CoRR, abs/1310.6343, 2013.
16. K. Simonyan and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 2015, arXiv:1409.1556v6 [cs.CV].
17. C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna. Rethinking the inception architecture for computer vision. arXiv preprint arXiv:1512.00567, 2015.
18. C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, et al. Going deeper with convolutions. In 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 1–9, 2015.
19. Swe, Z.O. Brain tumor detection and segmentation using watershed segmentation and morphological operation/ Z.O. Swe, S.K. Aung // International Journal of Research in Engineering and Technology. –2014. –Vol. 3. – Issue 03. – PP. 367-374.
20. M. D. Zeiler, G. W. Taylor, and R. Fergus. Adaptive deconvolutional networks for mid and high-level feature learning. In ICCV '11 Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, pages 2018–2025, 2011.

References

1. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer / PRESS-RELEASE No. 223 / [Electronic resource]. – Access mode: <http://globocan.iarc.fr/Default.aspx>.
2. Miroshnichenko A.S., Mikheliev V.M., Konyaeva E.S. – “Method of image classification” // XIX International Conference “Computer Science: Problems, Methodology, Technologies” (IPMT-2019) and X School-Conference “Computer Science in Education” (INED-2019), 14-15 February, Voronezh.

3. Miroshnichenko A.S., Mikhelev V.M. – “The method of recognition of objects in MRI images based on a convolutional neural network” // XVIII International Conference “Computer Science: problems, methodology, technologies” (IPMT-2018) and IXED – 2018, P. 181-185, 8-9 February, Voronezh.
4. MRI scan of the human brain [electronic resource]. – Access mode: http://eegeasy.com/articles/detail.php?ELEMENT_ID=26.
5. Modern types of tomography. Tutorial / M.Ya. Marusina, A.O. Kaznacheeva. – SPb.: SPbSU ITMO., 2006. – 152 p.
6. Francois Chollet, Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions. 2017, arXiv:1610.02357v3 [cs.CV].
7. K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Deep residual learning for image recognition. 2015, arXiv:1512.03385v1 [cs.CV].
8. K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification. 2015, arXiv:1502.01852v1 [cs.CV].
9. S. Ioffe and C. Szegedy. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. 2015, arXiv:1502.03167v3 [cs. LG].
10. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In NIPS, 2012.
11. Min Lin, Qiang Chen, and Shuicheng Yan. Network in network. CoRR, abs/1312.4400, 2013.
12. Manoj, L.L. Brain Tumor Detection and Segmentation Using Histogram Thresholding/ K.K. Manoj, Y.K. Soubrabh// International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2012. – Vol. 1. – Issue 04. – P. 16-20.
13. Mansfield, P. NMR Imaging in Biomedicine: Supplement 2 Advances in Magnetic Resonance/ P. Mansfield, P.G. Morris. – New York: Academic press, 1982. – 365 P.
14. Neeraj, S. Automated medical image segmentation techniques/ S. Neeraj, L.M. Aggarwal // Journal of medical physics. – 2010. – Vol. 35. – PP. 3-14.
15. Sanjeev Arora, Aditya Bhaskara, Rong Ge, and Tengyu Ma. Provable bounds for learning some deep representations. CoRR, abs/1310.6343, 2013.
16. K. Simonyan and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 2015, arXiv:1409.1556v6 [cs.CV].
17. C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna. Rethinking the inception architecture for computer vision. arXiv preprint arXiv:1512.00567, 2015.
18. C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, et al. Going deeper with convolutions. In 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 1–9, 2015.
19. Swe, Z.O. Brain tumor detection and segmentation using watershed segmentation and morphological operation/ Z.O. Swe, S.K. Aung // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3. – Issue 03. – PP. 367-374.
20. M.D. Zeiler, G.W. Taylor, and R. Fergus. Adaptive deconvolutional networks for mid and high-level feature learning. In ICCV '11 Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, pages 2018–2025, 2011.

Михелев Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем
Мирошниченко Андрей Сергеевич, студент кафедры математического и программного обеспечения информационных систем

Mikhelev Vladimir Mikhaylovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Software and Automated Systems
Miroshnichenko Andrey Sergeyevich, student of the department of mathematical and software information systems

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION

УДК 004.9:378

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-6

Никольский П.Г.
Кузнецов А.В.
Архипов С.Н.
Чистяков С.В.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБУЧАЮЩАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл, 302034, Россия

e-mail: npavel443@mail.ru, kvaa77@mail.ru, arhipovsernik@gmail.com

Аннотация

В условиях технического прогресса очень трудно подготовить специалиста в области телекоммуникаций, который в полной мере владел бы знаниями и навыками работы на всем оборудовании, эксплуатируемом им. Это вызвано непрерывным совершенствованием и обновлением образцов техники связи. Одним из способов решения данной проблемы являются компьютерные обучающие программы, позволяющие индивидуализировать процесс обучения с сохранением его качества. В связи с возрастающей ролью в современном процессе образования к компьютерным обучающим программам предъявляются ряд требований: наличие учебной цели, правильный подбор учебного материала, доступный интерфейс и т. д. Основными достоинствами компьютерных обучающих программ являются возможность самостоятельного обучения и самоконтроля, сосредоточение в одном месте материалов разного характера и простой доступ к ним, снижение затрат на преподавание и тиражирование печатных пособий. К недостаткам относят необходимость владения базовыми навыками работы на компьютере, малую интерактивность и сложность восприятия больших объемов информации с экрана дисплея. На сегодняшний день существует большое множество компьютерных обучающих программ, имеющих различные цели и задачи, что вызвало необходимость их классифицировать. В качестве классификационных признаков часто рассматривают готовность к применению, решаемые педагогические задачи и новизна учебного материала. В статье приведен пример компьютерной обучающей программы, с помощью которого более подробно рассмотрены основные требования и классификационные признаки.

Ключевые слова: компьютерные обучающие программы; программное обеспечение; учебный материал; процесс образования.

UDC 004.9:378

Nikolsky P.G.
Kuznetsov A.V.
Arkhipov S.N.
Chistyakov S.V.

COMPUTER TRAINING PROGRAMMS

Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitelnaya St, Orel, 302034, Russia

e-mail: npavel443@mail.ru, kvaa77@mail.ru, arhipovsernik@gmail.com

Annotation

In the context of technological progress, it is very difficult to train a telecommunications specialist who fully possesses the knowledge and skills to operate all the equipment operated by him. It is caused by continuous improvement and updating of samples of communication equipment. One of the ways to solve this problem is computer training programs that allow to individualize the learning process while maintaining its quality. In connection with the large role in the modern process of education to computer training programs have a number of requirements: the presence of the educational goal, the correct selection of educational material, accessible interface, etc. The main advantages of computer training programs are the ability to self-study and self-control, concentration in one place of materials of different nature and easy access to them, reducing the cost of teaching and replication of printed materials. The disadvantages include the need to have basic computer skills, low interactivity and difficulty in perceiving large amounts of information from the display screen. Today, there are a large number of computer training programs with different goals and objectives, which caused the need to classify them. Readiness for use, solved pedagogical tasks and novelty of educational material are often considered as classification features. The article also provides an example of a computer training program, with the help of which the basic requirements and classification features are considered in more detail.

Keywords: computer training programs; software; educational material; educational process.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня, в век развития информационных технологий [2], существует большое разнообразие оборудования в области телекоммуникаций, выполняющего различные функции: оборудование мультиплексирования, системы коммутации и маршрутизации, модемы и т.д. Как правило, специалист в данной области должен уметь эксплуатировать аппаратуру различного типа и вида.

В рамках получения высшего или среднего специального образования невозможно построить образовательный процесс таким образом, чтобы охватить все виды существующего оборудования ввиду ограниченности времени и человеческой памяти. К тому же, телекоммуникационные технологии постоянно развиваются и обновляются.

Специалисту в области телекоммуникаций для качественного выполнения возложенных на него задач необходимо постоянно совершенствовать свои навыки, изучать новое оборудование. Этот процесс должен продолжаться и после получения им образования в данной сфере. Одним из решений данной проблемы являются компьютерные обучающие программы, направленные на самостоятельное обучение человека, которые в свою очередь позволяют проходить обучение в удобное (свободное) для обучающегося время.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Определение, задачи и требования, предъявляемые к компьютерным обучающим программам

Компьютерная обучающая программа представляет собой специализированное программное обеспечение с понятным и доступным интерфейсом, имеющая цель – дать человеку необходимые навыки и знания в какой-либо специализированной области, например, работе на конкретном виде оборудования.

Можно выделить следующие основные педагогические задачи [7], решаемые с помощью компьютерных обучающих программ:

теоретическая подготовка в определенной предметной области или узкоспециализированном вопросе;

выработка практических навыков в данной области;

выработка умений решения как типовых, так и нестандартных задач;

проведение учебно-исследовательских экспериментов с моделями изучаемых объектов, процессов и явлений;

развитие навыков самостоятельного образования [9];

контроль и оценивание уровня знаний и умений.

Также можно сформулировать и основные требования [5], предъявляемые к компьютерным обучающим программам:

наличие цели учебной работы [3] – по результатам прохождения курса, предусмотренного компьютерной обучающей программой, обучаемый должен получить необходимые знания, умения и навыки;

правильный подбор учебного материала [8] и *грамотное его представление, обучающемуся структурированность программы* [6] – важным фактором обучения является подбор учебной информации, т. е. необходимо предоставить обучающемуся только «нужную» информацию в том виде, в котором она лучше всего усваивается;

доступный интерфейс, не требующий специальных навыков работы с ПЭВМ – разрабатывая компьютерную обучающую программу, необходимо принять во внимание тот факт, что не все обучаемые имеют достаточную квалификацию работы на ПЭВМ. Исходя из этого, любой пользователь, имеющий базовые навыки работы на компьютере, должен иметь возможность в полной мере разобраться с учебным материалом, предоставляемым программой;

ориентация на «среднего» обучающегося (за исключением узко специализированных обучающих программ) – необходимо подобрать обучающий материал таким образом, чтобы он был доступен для понимания обучающемуся, обладающим базовыми знаниями в данной области;

индивидуализация обучения (в необходимых пределах) – обучающая компьютерная программа должна иметь такой учебный материал и интерфейс, чтобы пользователь мог самостоятельно усвоить предоставляемую информацию без вмешательства педагога или с минимальным его вмешательством.

Достоинства и недостатки

компьютерных обучающих программ

Компьютерные обучающие программы являются ещё достаточно новым направлением в процессе образования. Они относятся к образовательным информационным технологиям и предоставляют широкий спектр возможностей в учебно-методической деятельности. На сегодняшний день компьютерные обучающие программы выступают в роли средств поддержки традиционных форм обучения, однако с их применением появляются новые возможности в обучении. Для того, чтобы разобраться в том, являются ли компьютерные обучающие программы лишь дополнительным средством получения образования или новой технологией, способной заменить традиционные средства, рассмотрим их достоинства и недостатки.

Достоинства компьютерных обучающих программ:

возможность сосредоточения в одном приложении учебного материала разного характера и обеспечение возможности легко перемещаться по нему через ссылки [4];

возможность представления данных в любой форме, удобной для восприятия (текст, картинки, анимация и др.);

дешевизна создания по сравнению с печатными учебными материалами, т. к. отсутствуют расходы на тиражирование;

доступность обучения, вызванная отсутствием необходимости изучения большого количества пособий и учебников;

возможность оценивания уровня знаний с автоматической проверкой ответов обучаемого;
развитие способностей к самообразованию;

сокращение времени, затрачиваемого на процесс обучения, т.к. значительно уменьшается количество лекций, семинаров и других видов занятий, требующих присутствия преподавателя;
уменьшение степени задействования преподавательского состава;
уменьшение затрат связанных с командированием сотрудников для прохождения переподготовки.

Исходя из множества положительных качеств, можно сделать вывод о необходимости использования компьютерных обучающих программ в современном процессе образования. Однако, они не смогут в полной мере заменить традиционные формы обучения, т. к. имеют ряд негативных сторон.

Недостатки компьютерных обучающих программ:

– необходимость наличия у обучаемого ПЭВМ, в некоторых случаях с доступом в интернет, но с другой стороны на сегодняшний день это не является критическим недостатком, т. к. ПЭВМ стали достаточно доступны;

– необходимость установки на ПЭВМ специализированного программного обеспечения, к которому в некоторых случаях предъявляются высокие требования к аппаратно-программному обеспечению;

– наличие у обучающегося специальных навыков работы с ПЭВМ;

– сложность усвоения больших объемов учебного материала с экрана дисплея;

– недостаточная интерактивность компьютерных обучающих программ [10] (существенно большая по сравнению с учебным пособием, но меньшая, чем при очном обучении);

– отсутствие непосредственного и регулярного контроля над ходом выполнения учебного плана.

Классификация компьютерных обучающих программ

К настоящему времени существует огромное множество компьютерных обучающих программ, однако общепризнанной их классификации не существует. Ниже приведен пример классификации по нескольким признакам, который является результатом обобщения данных из различных источников.

Готовность к применению

По данному классификационному признаку выделяют два типа программ:

1. Готовые обучающие программы

Программы данного типа, как правило, направлены на решение специальной задачи: рассмотрение отдельного вопроса учебного курса, изучение конкретного вида оборудования и т. д. Являются готовым программным продуктом и не допускают каких-либо изменений ни в своей структуре, ни в содержащемся в них учебном материале. Преподавателю необходимо методически встраивать их в процесс обучения.

Завершенность программ данного типа накладывает большую ответственность на разработчиков по подбору и распределению учебного материала. Их основным недостатком является отсутствие гибкости, т. е. для преподавателя нет возможности редактировать имеющийся материал или добавлять новый в зависимости от конкретных учебных задач.

2. Обучающие программы, заполняемые преподавателем

Представляют собой программную оболочку, заполняемую предметным содержанием пользователем-непрограммистом. Преподаватель имеет возможность изменять содержащийся в них учебный материал, тем самым подстраивая обучающую программу под свою модель

преподавания, и меняющиеся тенденции с учетом развития технологий. Результатом заполнения будет являться автоматизированный курс, предоставляющий возможность редактирования предметного содержания.

Недостатком программ данного типа является необходимость значительного вмешательства преподавателя в процесс обучения и обладание им достаточной квалификацией в рассматриваемой в программе предметной области.

Решаемые педагогические задачи

В зависимости от решаемых педагогических задач компьютерные обучающие программы делятся на четыре группы [3]:

1. Средства теоретической подготовки

Предназначены для теоретической подготовки обучаемого. Содержат большое количество учебной информации, что выдвигает к ним дополнительные требования по структурированности учебного материала. Примером такой программы является электронный учебник.

Также к средствам теоретической подготовки относят компьютерные программы контроля знаний. Они могут быть выполнены, например, в виде теста. Учебный материал в контролирующих программах либо не предоставляется совсем, либо представлен в виде подсказок или правильных ответов после среза знаний.

2. Средства практической подготовки

Представляют собой программные средства, направленные на выработку практических навыков в какой-либо предметной области. В них содержится минимум теоретического учебного материала, необходимый для рассмотрения учебных вопросов с практической стороны. Примерами программ данной группы являются практикумы (задачники), предназначенные для выработки у обучаемого навыков решения задач в определенной предметной области, и компьютерные тренажеры, направленные на развитие способностей и навыков в определенном виде деятельности.

3. Комплексные средства

Программы данной группы содержат теоретический материал и средства для практической подготовки. Являются объединением первых двух групп программ, т.е. предоставляют обучающемуся учебный материал в необходимом объеме и вырабатывают навыки практической деятельности в определенной области.

4. Вспомогательные средства [3]

Направлены на получение обучаемым обучающимся теоретических знаний и практических навыков в определенной предметной области или виде деятельности, т.е. являются комплексными средствами, но при самостоятельном применении содержащегося в них учебного материала недостаточно для выполнения учебных целей. Применяются в качестве программ, поддерживающих учебный процесс. К ним относят лабораторные практикумы, справочники и мультимедийные учебные занятия (записи реального учебного занятия (лекции, семинара, демонстрации), презентации и др.)

Новизна учебного материала

Все компьютерные обучающие программы можно разделить на два типа в зависимости от новизны предоставляемого материала:

1. Программы, основной целью которых является усвоение новых знаний или выработка новых умений и навыков.

2. Программы, предназначенные для повторения материала или закрепления навыков. Предполагается, что обучаемый ранее изучал данные учебные вопросы и имеет определенные практические или теоретические знания.

Пример компьютерной обучающей программы

В качестве примера рассмотрим, разработанную авторским коллективом, обучающую программу для модема FlexGain-FOM-16OG, AD. Данный программный продукт предназначен для обучения специалистов в области телекоммуникаций для работы на оборудовании FlexGain-FOM-16OG, AD.

Рассмотрим требования к компьютерным обучающим программам на примере предложенного приложения:

1. Наличие цели

Как было отмечено выше, данная обучающая программа имеет цель получение теоретических знаний и практических навыков эксплуатации на—оборудования FlexGain-FOM-16OG, AD.

2. Правильный подбор учебного материала, структурированность

Рассматриваемое приложение имеет четкую структуру. Учебный материал разбит на разделы.

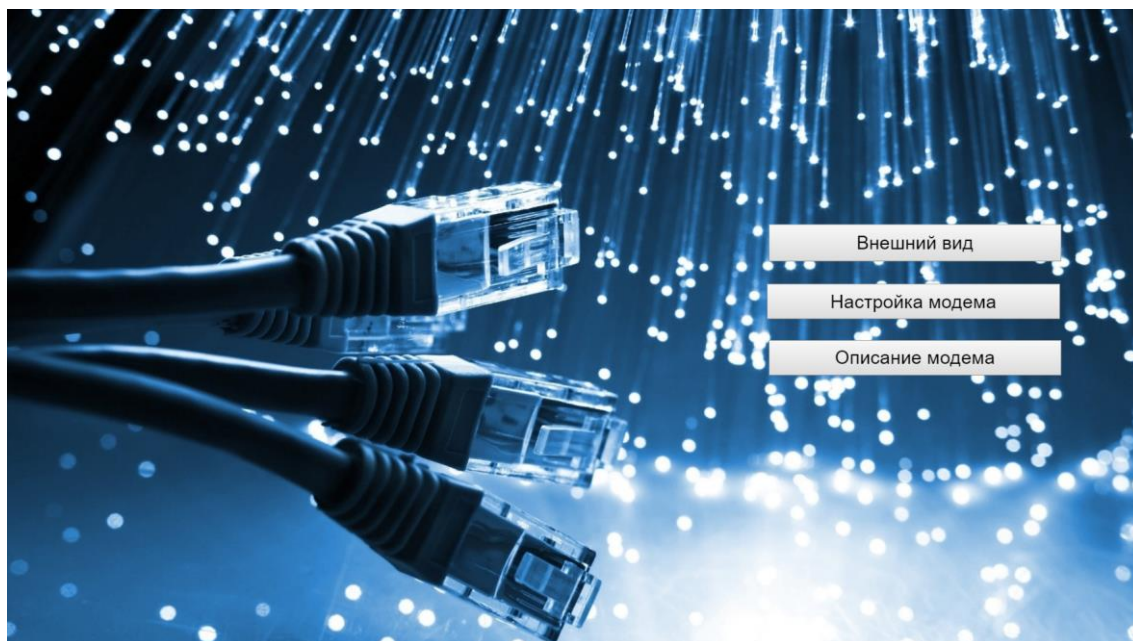


Рис. 1. Меню обучающей программы

Fig. 1. Tutorial menu

Как видно из рисунка 1, учебный материал программы разбит на два раздела, из которых первый и второй отвечают за теоретическую и практическую подготовку, а второй – только за теоретическую подготовку обучаемого.

Второй раздел «Настройка модема» содержит три подраздела, соответствующие возможным способам настройки модема, что видно на рисунке 2.

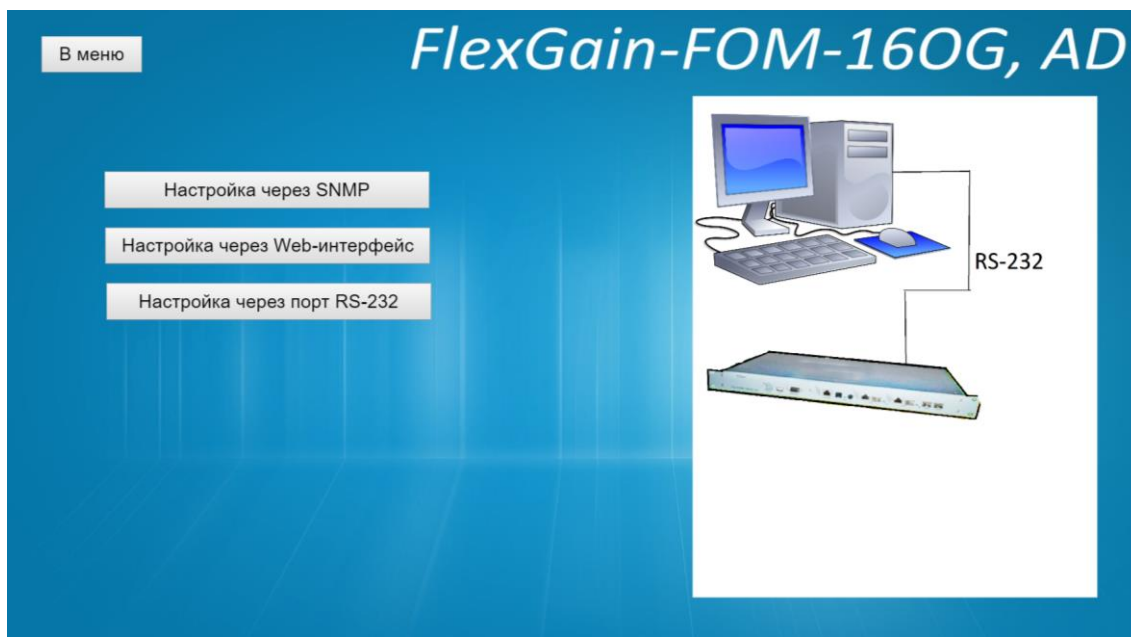


Рис. 2. Раздел «Настройка модема»

Fig. 2. Section "Modem Setup"

3. Доступный интерфейс

Для перехода в один из разделов или подразделов требуется нажать на соответствующую кнопку, для чего не требуется специальных навыков работы с ПЭВМ. Также в приложении имеются подсказки (рис. 3).

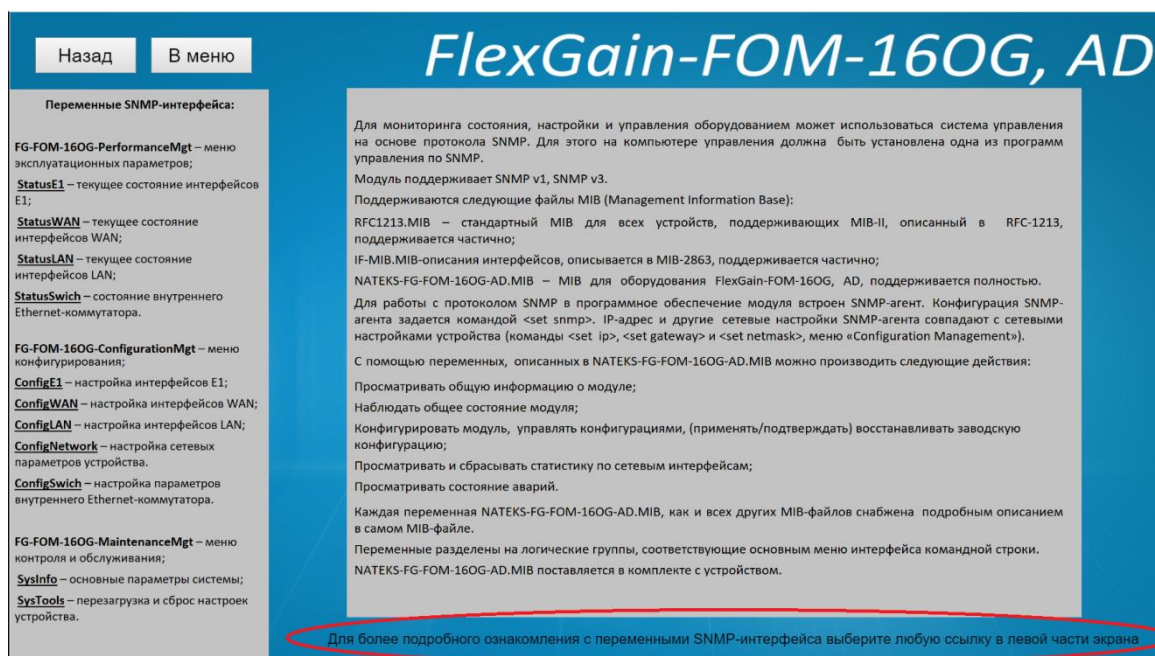


Рис. 3. Подраздел “Настройка через SNMP-интерфейс”

Fig. 3. Subsection “Configuration via SNMP-interface”

4. Ориентация на среднего обучаемого

Учебный материал данной обучающей программы подобран таким образом, что от обучающегося не требуется изначальных глубоких знаний в данной области. Информация представлена в доступном и легком для понимания виде (рис. 4).

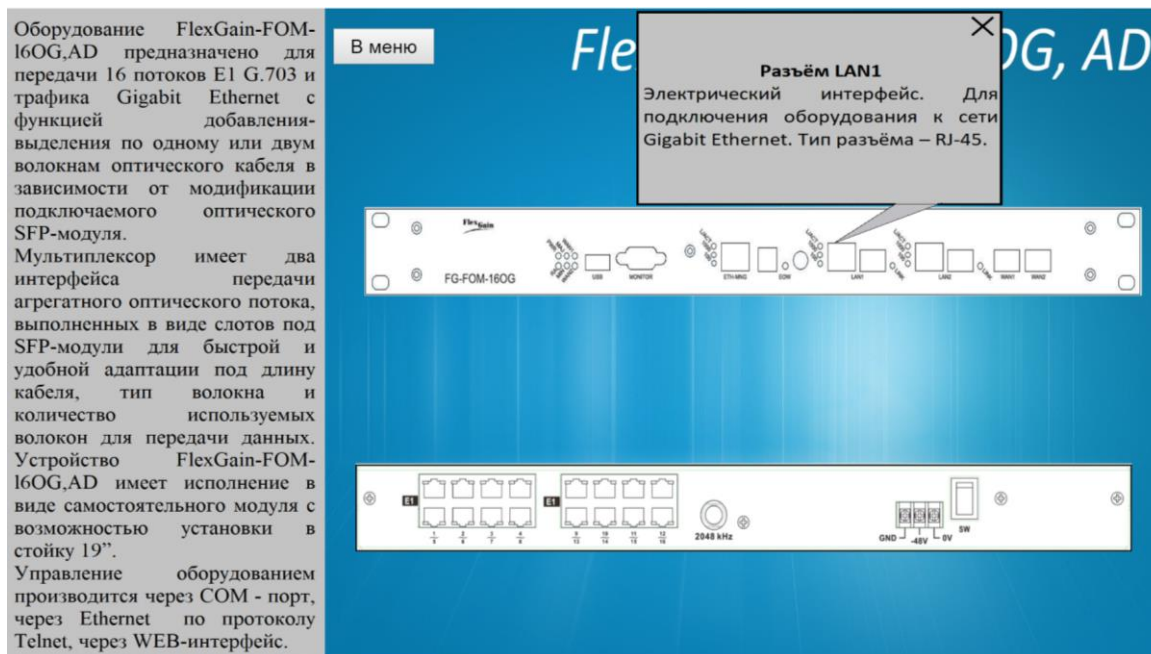


Рис. 4. Раздел “Описание модема”
Fig. 4. Section “Modem Description”

5. Индивидуализация обучения

Для усвоения учебного материала, представленного в программе, обучающемуся не требуется помощи преподавателя.

Рассмотрим классификацию обучающих компьютерных программ на примере данного приложения.

По первому классификационному признаку «Готовность к применению» рассматриваемая программа относится к готовым обучающим программам, т. к. у преподавателя нет возможности что-либо изменять или добавлять в программу.

По второму классификационному признаку «Решаемые педагогические задачи» данная обучающая программа относится к комплексным средствам, т. к. содержит учебный материал для теоретической и практической подготовки обучающегося.

По третьему классификационному признаку «Новизна учебного материала» рассматриваемая программа относится к программам, ориентированным преимущественно на усвоение новых понятий, т. к. программа построена учитывая, что пользователь до этого не имел навыков работы на оборудовании FlexGain-FOM-16OG, AD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье подробно рассмотрено понятие компьютерной обучающей программы на конкретном примере для специализированного оборудования для

телекоммуникаций, представлены требования к ней, достоинства и недостатки, а также их классификации.

Из всего выше перечисленного можно сделать вывод о важности компьютерных обучающих программ в процессе обучения, т. к. с их помощью возможно индивидуализировать процесс освоения учебного материала с сохранением качества традиционных форм обучения.

Также стоит отметить, что компьютерные обучающие программы постоянно развиваются и совершенствуются, разрабатываются новые подходы к их созданию. Например, стали появляться «интеллектуальные» программы, которые осуществляют рефлексивное управление учебной деятельностью, что предполагает построение модели обучающегося. Многие из них генерируют обучающие воздействия (учебные тексты, задачи, вопросы, подсказки). Такие программы, как правило, учитывают не только правильность ответа, но и способ решения, могут его оценивать, а некоторые ещё и совершенствовать стратегию обучения с учетом накапливаемого опыта.

Список литературы

1. Кругликов Г.И. Дидактические средства на занятиях по технологии // Школа и производство. 1999. №4. С 3-12.
2. Шафрин Ю.А. Информационные технологии / Москва Лаборатория Базовых Знаний. 1999. I часть. С. 21-24.
3. Коджаспирова Г.М. Технические средства обучения и методика их использования / АСADEM А. 2001. С. 12.
4. Романкова А.А. Информационные технологии в образовании / Романкова А.А., Титова Е.И. // Молодой ученый. Март 2015. Вып. №6. С 677-679.
5. Куприянов М. В. Дидактический инструментальный набор новых образовательных технологий // Высшее образование в России. 2001. № 3. С. 124-126.
6. Тихомиров В. А. Качество обучения в виртуальной среде: компьютерные технологии в обучении / Тихомиров В. А., Рубин Ю. М. Самойлов В. Д. // Высшее образование в России. 1999. № 6. С. 21-25.
7. Киселев Г.М. Информационные технологии в педагогическом образовании / Киселев Г.М., Бочкова Р. В. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К». 2014. С. 37-41.
8. Дендев Б. Информационные и коммуникационные технологии в образовании. – М.: ИИТО ЮНЕСКО. 2013. С. 79-83.
9. Андреев А. А. Педагогика высшей школы // М.: МЭСИ. 2000. С. 287-292.
10. Машбиц Е. И. Психолого-педагогические основы проблемы компьютеризации обучения. – М.: Педагогика. 1988. С. 2-10.

References

1. Kruglikov G. I. Didactic means in the classroom technology // School and production. 1999. №4. Page 3-12.
2. Safrin Y. A. Information technology / Moscow Laboratory of Basic Knowledge. 1999. I part. pp. 21-24.
3. Kodzhaspirova G. M. Technical training and methods of their application/ АСADEM А. 2001. P. 12.
4. Romankova A. A. Information technologies in education / Romankova A.A., Titova E. I. // Young scientist. March 2015. Issue № 6. pp. 677-679.
5. Kupriyanov M. V. Didactic Toolkit of new educational technologies // Higher education in Russia. 2001. № 3. pp. 124-126.
6. Tikhomirov V. A. Quality of education in virtual environment: computer technologies in education / Tikhomirov V. A., Rubin Y. M., Samoilov V. D. // Higher education in Russia. 1999. № 6. pp. 21-25.
7. Kiselev G. M. Information technologies in pedagogical education / Kiselev G. M., Bochkova R.V. // Moscow Publishing and trading Corporation "Dashkov and K". 2014. pp. 37-41.

8. Dendev B. Information and communication technologies in education // М.: UNESCO ITE.2013. pp. 79-83.
9. Andreev A. A. Pedagogy of higher school // М.: MESI. 2000. pp. 287-292.
10. Mashbits E. I. Psychological and pedagogical bases of a problem of computerization of training // М.: Pedagogics. 1988. pp.2-10.

Никольский Павел Геннадьевич, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Кузнецов Андрей Викторович, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Архипов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Чистяков Сергей Владимирович, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Nikolsky Pavel Gennadyevich, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Kuznetsov Andrey Viktorovich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Arkhipov Sergey Nikolaevich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Chistyakov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

УДК 621.391.63:681.7.068

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-7

Александров Д.Д.
Косов Е.О.
Архипов С.Н.

**ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ПАССИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ ПУТЕМ
ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МАРШРУТОВ**

Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации», ул. Приборостроительная, д. 35, г. Орёл, 302034, Россия

e-mail: danillaleksandrov57@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается один из вариантов решения задачи повышения живучести пассивных оптических сетей на основе представления сети в виде оптического многополюсника с использованием теории матриц рассеяния и передачи

Ключевые слова: пассивные оптические сети; живучесть; связность; оптические делители; оптическое сетевое окончание; оптическое линейное окончание; матрицы рассеяния и передачи; многополюсник.

UDC 621.391.63:681.7.068

Aleksandrov D.D.
Cosov. E.O.
Arkhipov S.N.

**IMPROVING THE LIFE OF THE PASSIVE OPTICAL NETWORK
BY FORMING ADDITIONAL ROUTES**

Federal state military educational institution of higher professional education "Academy of the Federal security service of the Russian Federation", 35 Priborostroitel'naya St, Orel, 302034, Russia

e-mail: danillaleksandrov57@mail.ru

Abstract

The paper discusses one of the solutions to the problem of increasing the survivability of passive optical networks based on the representation of the network as an optical multipole using the theory of scattering matrices and transmission

Keywords: passive optical networks; vitality; connectivity; optical dividers; optical network termination; optical linear termination; scattering and transmission matrices; multipole.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, элементы обработки волновых потоков, а именно оптические делители (ОД), фильтры и аттенюаторы относятся к "сетевым элементам", выполняющим сетевые функции (СЭФ) в пределах логического объекта. Понимая под логическим объектом сеть, построенную по технологии *PON* и учитывая требования ГОСТ Р 53111-2008 предлагается анализ эффекта разветвления на основе свойств сети древовидной структуры. Анализ [1] показал, что решение задачи повышения живучести через увеличение связности сети приводит к необходимости формирования дополнительных направлений связи и возможности резервирования энергетического потенциала источника, при этом, резервирование потенциала источника должно осуществляться за счет использования оптических делителей с изменяемым коэффициентом деления при оптимальном распределении бюджета мощности с неравномерным распределением энергии по направлениям.

Воспользовавшись представлением сети в виде "оптического многополюсника" на основе подходов теории матриц рассеяния и передачи [2, 3] определим основные энергетические условия реализации задачи повышения живучести через увеличение связности и резервирование энергетического потенциала. Данный подход справедлив, поскольку в *PON* сетях используются

только линейные пассивные элементы, а присоединяемые оптические волокна (ОВ) имеют идентичные параметры.

Обобщенная схема типовой PON сети, может быть представлена в виде каскадного параллельно-последовательного соединения $2N$ многополюсников с учетом известных соотношений взаимосвязи коэффициентов матриц рассеяния и матриц передачи ОВ-ОД, показанная на рисунке 1.

Значения коэффициентов деления ОВ-ОД, при принятой нумерации в обобщенной схеме PON сети запишем в виде матрицы строки $\mathbf{K}$

$$\mathbf{K} = k_{11}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{iN}, \dots, k_{Mj}, \dots, k_{MN}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, M$ – определяют номер выхода/входа оптического сетевого окончания (ONT); $j = 1, 2, \dots, N$ – задают номер уровня PON сети, на котором расположен ОВ-ОД – элемент матрицы.

Каждый элемент сети, как $2N$ многополюсник оптического диапазона характеризуется коэффициентом отражения

$$\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_{11}, \dots, \Gamma_{ij}, \dots, \Gamma_{iN}, \dots, \Gamma_{Mj}, \dots, \Gamma_{MN}]. \quad (2)$$

Тогда, при известной общей $P_0(\lambda)$ мощности на выходе оптического линейного окончания (OLT) сети, на входе каждого ONT получим входную мощность оптического (прямого) потока, определяемую соотношением

$$P_{ij}(\lambda) = P_0(\lambda) \left(\prod_{j=1}^N (1 - |\Gamma_{ij}(\lambda)|^2) (W_{ij}(\lambda))^{\ell_{i,j}} \frac{1}{k_{ij}(\lambda)} \right), \quad (3)$$

где λ – длина волны распределяемого по сети волнового потока; $W_{ij}(\lambda)$ – затухание в волокне в зависимости от длины $\ell_{i,j}$ линии соответствующего j -го уровня PON сети.

Каскадное соединение многополюсников можно представить в виде объединения блочных $\mathbf{S}$ -матриц рассеяния. Воспользовавшись данным представлением, для каждого уровня PON сети получим отдельную матрицу рассеяния:

$$\mathbf{S}^N = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^N & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha\beta}^N \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\beta\alpha}^N & \vdots & \mathbf{S}_{\beta\beta}^N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^{N-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} & \vdots & \mathbf{S}_{\beta\gamma}^{N-1} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\gamma\beta}^{N-1} & \vdots & \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{N-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{S}^{III} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{III} & \vdots & \mathbf{S}_{\gamma\mu}^{III} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\mu\gamma}^{III} & \vdots & \mathbf{S}_{\mu\mu}^{III} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^{II} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\mu\mu}^{II} & \vdots & \mathbf{S}_{\mu\nu}^{II} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{\nu\mu}^{II} & \vdots & \mathbf{S}_{\nu\nu}^{II} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^I = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\nu\nu}^I & \vdots & \mathbf{S}_{\nu o}^I \\ \dots & \vdots & \dots \\ \mathbf{S}_{o\nu}^I & \vdots & \mathbf{S}_{oo}^I \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где матрицы: $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^N$ – определяет коэффициенты отражения волнового потока на входе многополюсника и коэффициенты взаимной связи между его входами; $\mathbf{S}_{\beta\alpha}^N$ – определяет коэффициент передачи со входа многополюсника сетевого уровня N на его выход; $\mathbf{S}_{\alpha\beta}^N$ – определяет коэффициенты передачи волнового потока многополюсника с выхода на его вход; $\mathbf{S}_{\beta\beta}^N$ – определяет коэффициенты отражения от выхода многополюсника и взаимосвязи между

различными выходами; обозначения (индексы) $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \nu, o$ – определяют границы групп входов (выходов) многополюсников соответствующих $(N, N-1, III, II, I, O)$ уровней сети.

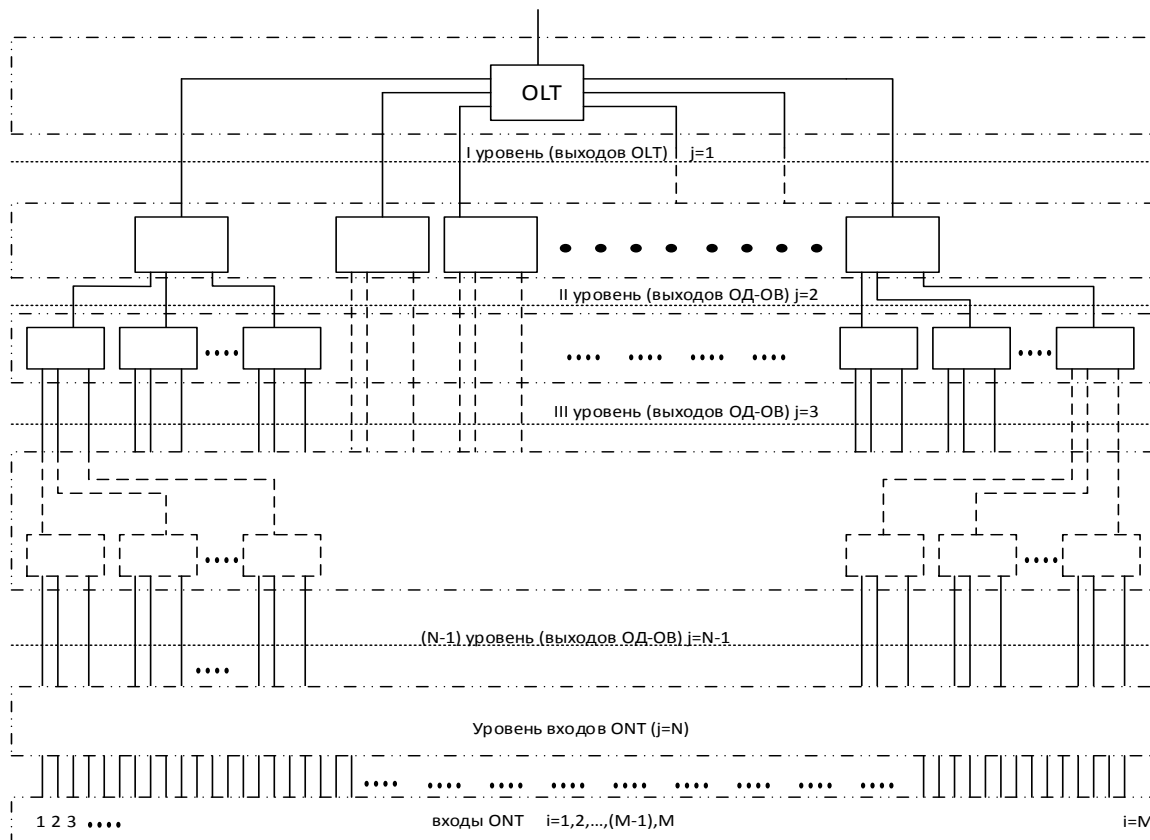


Рис. Обобщенная структура PON сети в виде каскадно-последовательного соединения $2N$ многополюсников

Fig. The generalized structure of the PON network in the form of a cascade-series connection of $2N$ multipoles

Выполняя объединение многополюсников уровня N и $N-1$, получим:

$$\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\sum(N,N-1)} = \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^N + \mathbf{S}_{\alpha\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N)^{-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\alpha}^N, \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_{\alpha\gamma}^{\sum(N,N-1)} = \mathbf{S}_{\alpha\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N)^{-1} \mathbf{S}_{\beta\gamma}^N, \quad (7)$$

$$\mathbf{S}_{\gamma\alpha}^{\sum(N,N-1)} = \mathbf{S}_{\gamma\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N)^{-1} \mathbf{S}_{\beta\alpha}^N, \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{\sum(N,N-1)} = \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^N + \mathbf{S}_{\gamma\beta}^N (\mathbf{I} - \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^N)^{-1} \mathbf{S}_{\beta\beta}^{N-1} \mathbf{S}_{\beta\gamma}^N, \quad (9)$$

$$\mathbf{S}^A = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\sum(N,N-1)} & : & \mathbf{S}_{\alpha\gamma}^{\sum(N,N-1)} \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{\gamma\alpha}^{\sum(N,N-1)} & : & \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^{\sum(N,N-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^A & : & \mathbf{S}_{\alpha\gamma}^A \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{\gamma\alpha}^A & : & \mathbf{S}_{\gamma\gamma}^A \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где индекс $A \Rightarrow \sum(N, N-1)$ и введен для упрощения записи.

Последовательно (от ONT к OLT), выполняя объединение многополюсников в соответствии с выражениями (5–9) получим:

$$\mathbf{S}^B = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(A,III)} & : & \mathbf{S}_{\alpha\mu}^{\Sigma(A,III)} \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{\mu\alpha}^{\Sigma(A,III)} & : & \mathbf{S}_{\mu\mu}^{\Sigma(A,III)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^B & : & \mathbf{S}_{\alpha\mu}^B \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{\mu\alpha}^B & : & \mathbf{S}_{\mu\mu}^B \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{S}^B = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(B,II)} & : & \mathbf{S}_{\alpha\nu}^{\Sigma(B,II)} \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{\nu\alpha}^{\Sigma(B,II)} & : & \mathbf{S}_{\nu\nu}^{\Sigma(B,II)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^B & : & \mathbf{S}_{\alpha\nu}^B \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{\nu\alpha}^B & : & \mathbf{S}_{\nu\nu}^B \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{S}^C = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^{\Sigma(B,I)} & : & \mathbf{S}_{\alpha o}^{\Sigma(B,I)} \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{o\alpha}^{\Sigma(B,I)} & : & \mathbf{S}_{oo}^{\Sigma(B,I)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C & : & \mathbf{S}_{\alpha o}^C \\ \dots & : & \dots \\ \mathbf{S}_{o\alpha}^C & : & \mathbf{S}_{oo}^C \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где элементы каждой блочной матрицы определяются соотношениями (6–9) при соответствующем изменении индексов объединяемых многополюсников *PON* сети.

В результирующей матрице (13) рассеяния *PON* сети $\mathbf{S}^C$, ее коэффициенты определяют: $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C$ – коэффициенты отражения и взаимной связи между элементами и типами волн (модами) на входе элементов всей сети со стороны *ONT* (обратного оптического потока); $\mathbf{S}_{oo}^C$ – коэффициенты отражения и взаимной связи между элементами и типами волн (модами) на входе сети со стороны *OLT* (прямого оптического потока); $\mathbf{S}_{\alpha o}^C$ – коэффициенты передачи от источника (*OLT*) к потребителям (прямого оптического потока); $\mathbf{S}_{o\alpha}^C$ – коэффициенты передачи от *ONT* к *OLT* (обратного оптического потока).

Из (13) следует, что элементы матрицы $\mathbf{S}^C$ определяют коэффициенты отражения $\mathbf{\Gamma}_O$ всей сети при прямой (от *OLT* к *ONT*) и $\mathbf{\Gamma}_N$ – обратной (от *ONT* к *OLT*) передаче волновых потоков:

$$\mathbf{\Gamma}_O = \mathbf{S}_{oo}^C + (\mathbf{S}_{\alpha o}^C \mathbf{S}_{o\alpha}^C \mathbf{\Gamma}_{ont} / (1 - \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C \mathbf{\Gamma}_{ont})), \quad (14)$$

$$\mathbf{\Gamma}_N = \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C + (\mathbf{S}_{\alpha o}^C \mathbf{S}_{o\alpha}^C \mathbf{\Gamma}_{olt} / (1 - \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C \mathbf{\Gamma}_{olt})), \quad (15)$$

где $\mathbf{\Gamma}_{ont}$, $\mathbf{\Gamma}_{olt}$ – матрицы известных (паспортных) коэффициентов отражения *ONT* и *OLT*, как нагрузки оптической линии. Полагая выходы/входы *ONT* и *OLT* согласованными, т.е. $|\mathbf{\Gamma}_{ont}| = 0$, $|\mathbf{\Gamma}_{olt}| = 0$, что, как правило, выполняется, не снижая общности решения, имеем

$$\mathbf{\Gamma}_O = \mathbf{S}_{oo}^C, \quad \mathbf{\Gamma}_N = \mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C. \quad (16)$$

Известно, что оптимальное в среднеквадратическом приближении решение задачи минимизации функционала $\|\vec{x} - \vec{y}\|^2 = (\vec{x} - \vec{y}, \vec{x}^* - \vec{y}^*)$, получают с помощью процедуры Грама – Шмидта в виде определителя блочной или окаймленной матрицы

$$\vec{y} = - \det \begin{bmatrix} \Gamma_p & \vdots & \vec{\Psi} \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \mathbf{u} & \vdots & 0 \end{bmatrix} / \det \Gamma_p, \quad (17)$$

где Γ_p – матрица Грама; $\vec{\Psi}$ – матрица-столбец, полностью определенного базиса заданного пространства; $\mathbf{u}$ – матрица-строка воспроизводимого вектора $\vec{x}$.

Элементы квадратной матрицы $\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C$, матрицы $\mathbf{S}^C$ PON сети определяются соотношением $|\mathbf{S}_{ij}^C|^2 = \mathbf{S}_{ij}^C \mathbf{S}_{ij}^{*C}$ и соответствуют элементам матрицы Грама.

Таким образом, основным условием реализации задачи повышения живучести ветви и всей сети через увеличение связности при обеспечении возможности одновременного резервирования энергетического потенциала является ортогонализация (путем коммутации) функций распределения векторов матрицы-столбца $\mathbf{S}_{\alpha o}^C$ PON сети и выполнение условия согласования ОК-ОД с набором оптических линий, что выполнимо, т.к. выполнение равенства $\mathbf{S}_{oo}^C = 0$ дает возможность реализовать распределение $\vec{z}^C$ векторов матрицы-строки $\mathbf{S}_{o\alpha}^C$ с минимальным среднеквадратичным отклонением от требуемого (оптимальным по потерям)

$$\vec{z}^C = - \det \begin{bmatrix} (|\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C|^2) & \vdots & \mathbf{S}_{\alpha o}^C \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ \mathbf{S}_{o\alpha}^C & \vdots & 0 \end{bmatrix} / \det (|\mathbf{S}_{\alpha\alpha}^C|^2). \quad (18)$$

Следовательно, решение задачи повышения живучести сети по технологии PON, возможно путем формирования нескольких оперативно изменяемых коммутируемых направлений (подключения дополнительных маршрутов), что одновременно дает возможность резервирования "энергетического бюджета" [4] при неравномерном (оптимальном) распределении коэффициентов деления (передачи) путем установки требуемых коэффициентов отражения (Γ).

Список литературы

1. Архипов, С. Н. Алгоритм оптимизации бюджета PON сети / С. Н. Архипов, И. С. Полянский // Телекоммуникации. – Специальный выпуск. Москва, 2012. – с. 3–9.
2. Фельдштейн, А. Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ/ Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р – М.: "Связь", 1971. – 387с.
3. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
4. Бутусов, М. М. Волоконно-оптические системы передачи / Бутусов М. М., Верник С. М., Галкин С. Л. и др. Под ред. В. Н. Гомзина.: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь. – 1992. – 416 с.

References

1. Arkhipov, S.N. Algorithm of PON Network Budget Optimization / S.N. Arkhipov, I.S. Polyansky // Telecommunications. – Special issue. Moscow, 2012. – p. 3-9.
2. Feldstein, A. L. Synthesis of quadripoles and eight-poles on microwave / Feldstein A.L., Yavich L.R. – M.: Svyaz, 1971. – 387 p.

3. Sazonov, D. M. Antennas and microwave devices: A textbook for radio specials. High schools. – M.: Higher school, 1988. – 432 p.

4. Butusov, M. M. Fiber-optical transmission systems / Butusov M. M., Vernik S. M., Galkin S. L., et al. Ed. VN Gomzin.: Textbook for universities. – M.: Radio and communication. – 1992. – 416 p.

Александров Даниил Дмитриевич, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Косов Егор Олегович, студент Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Архипов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации

Aleksandrov Daniil Dmitrievich, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Kosov Egor Olegovich, student Academy of the Federal security service of the Russian Federation

Arkhipov Sergey Nikolaevich, candidate of technical sciences, Academy of the Federal security service of the Russian Federation

УДК 004.056.52

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-8

Гончаренко Ю.Ю.
Нестеренко В.Р.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КРИПТОСТОЙКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053, Россия

e-mail: iuliay1985@mail.ru, closetonowhere@protonmail.com

Аннотация

В данной статье рассмотрены перспективы, технологии и способы использования биометрических данных в криптосистемах. А также предложен способ использования случайных биометрических данных для генерации 256-битных последовательностей.

Ключевые слова: биометрический образ; генеративно-состязательные нейронные сети; искусственные нейронные сети; криптография.

UDC 004.056.52

Goncharenko J.J.
Nesterenko V.R.

**USE OF RANDOM BIOMETRIC IMAGES FOR GENERATING
CRYPTO-RESISTANT SEQUENCES USING GENERATIVE-COMPETITIVE
NEURAL NETWORKS**

FSAEI HE "Sevastopol state University", University street 7, Sevastopol, 299053, Russian

e-mail: iuliay1985@mail.ru, closetonowhere@protonmail.com

Abstract

This article discusses the prospects, technologies and methods of using biometric data in cryptosystems. A method of using random biometric data for generating 256-bit sequences is also proposed.

Keywords: biometric image; generative-competitive neural networks; artificial neural networks; cryptography.

ВВЕДЕНИЕ

Криптографические системы с использованием биометрических данных открывают новые перспективы в обеспечении информационной безопасности. Совокупность таких технологий, как преобразование нечетких биометрических параметров в ключевые последовательности, распознавание биометрических образов и криптография, образуют новый вид криптографии – биометрическую криптографию. В криптосистемах такого вида ключи зависят от биометрических данных абонентов.

Со стремительным развитием алгоритмов машинного обучения и алгоритмов распознавания образов, качество биометрических криптосистем многократно возросло, что проявляется в снижении ошибок первого и второго рода и в повышении надежности.

Выделяют три вида биометрических криптосистем в зависимости от цели: биометрические криптографические системы с освобождением ключа, биометрические криптографические системы со связыванием ключа и биометрические криптографические системы с генерацией ключа.

В криптосистемах с освобождением ключа биометрический эталон и ключ хранятся отдельно друг от друга и процесс аутентификации осуществляется независимо от операции

освобождения ключа. Ключ освобождается после аутентификации пользователя. В криптосистемах со связыванием ключа биометрический эталон и ключ связаны криптографическим преобразованием. Ключ закрывается биометрическими данными и может быть раскрыт только обладателем соответствующих биометрических параметров. Криптосистемы с генерацией ключа обладают отличительной особенностью: ключ генерируется из биометрических данных пользователя [1]. Подобный подход позволяет не передавать ключ, а передавать только биометрические данные. Генерация ключа происходит с использованием преобразования «биометрический образ – код». Используя данные преобразование, становится возможным выделять из вектора биометрических данных двоичный код размером 256 бит.

Последние достижения в машинном обучении, а именно создание генеративно-состязательной нейронной сети, и преобразование «биометрический образ-код» предоставляют альтернативный способ использовать биометрические данные в криптосистемах: теоретически использовать псевдослучайные биометрические данные для генерации ключей и псевдослучайных последовательностей размером 256 бит.

ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫЕ НЕЙРОСЕТИ

Генеративно-состязательная сеть (GAN) – алгоритм машинного обучения без учителя, состоящий из двух нейронных сетей: генератора и дискриминатора. Одна из основных целей такой нейронной сети – генерация искусственно-созданных изображений определенных объектов, которые будут максимально неотличимы от изображений реально существующих объектов. На вход генератора подается случайный вектор, который будет преобразован в изображение и отправлен в дискриминатор. Дискриминатор производит сравнения сгенерированного изображения с реальными примерами и поддерживает обратную связь с генератором. Со временем генератор начнет производить более реалистичные изображения, а дискриминатор будет все сложнее и сложнее обойти. Таким образом, в процессе обучения изображения будут генерироваться с каждым разом все более приближенно к реальным объектам. Изображение создается следующим образом: начинается создание основание изображения с малого разрешения, постепенно повышая разрешение и добавляя новые детали на изображение. Подобный подход был предложен в 2018 разработчиками из NVidia и назван ProGAN.

StyleGAN – нейронная сеть, основанная на ProGAN, но с некоторыми нововведениями, качественно меняющими принцип работы Генератора с входными данными. В ProGAN генерация изображения полностью зависела от входного случайного вектора значений и данных, которые были до этого использованы для обучения. Например, если изображения с людьми с черными волосами повторяются слишком часто в наборе данных, то большая часть входных значений случайного вектора будет «привязана» к этой особенности.

Однако в StyleGAN реализована еще одна нейронная сеть, которая обрабатывает поток входных случайных данных генератора таким образом, чтобы создать новый вектор $\bar{W}$, который не должен зависеть от распределения особенностей при тренировке и должен понизить корреляцию между биометрическими особенностями [2].

$$AdaIN(x_i, y) = y_{s,i} \frac{x_i - \mu(x_i)}{\sigma(x_i)} + y_{b,i}, \quad (1)$$

где $y_{s,i}$ – вектор масштаба;

$y_{b,i}$ – вектор смещения;

x_i – результат операции свертки.

Адаптивная нормализация образца (AdaIN) – модуль, который переводит данные вектора W в сгенерированное изображение. Модуль добавляется на каждый уровень разрешения

нейронной сети и определяет визуальное отображение особенностей лица на данном уровне разрешения (рис. 1)

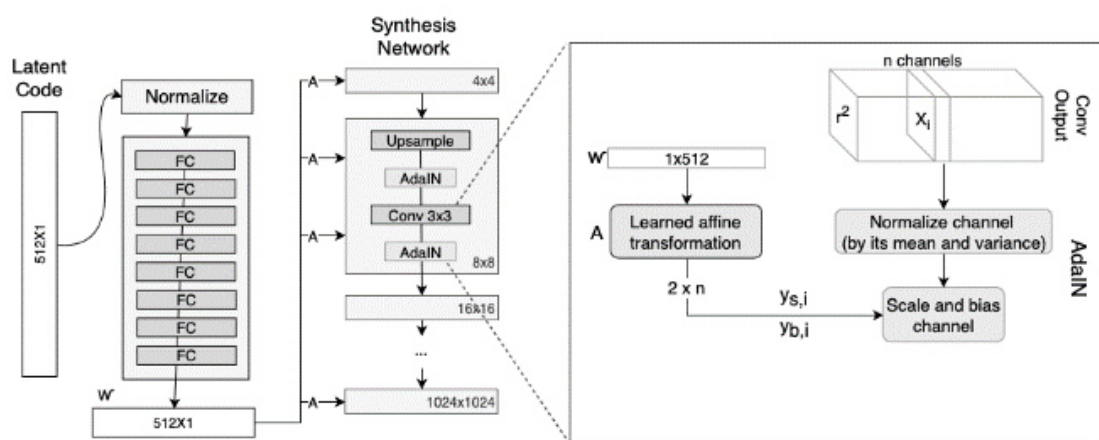


Рис. 1. Генеративно-состязательная нейронная сеть AdaIN

Fig. 1. Generative-adversarial neural network AdaIN

Визуальное отображение определяется в 3 этапа:

1) каждый канал выхода сверточного слоя нормализуется, чтобы убедиться в том, что этап 3 имеет ожидаемый эффект;

2) слой A преобразовывает вектор $\bar{W}$ в векторы масштаба и смещения для каждого канала;

3) векторы масштаба и смещения сдвигают каждый канал выхода операции свертки.

Эта настройка переводит информацию из вектора $\bar{W}$ в ее визуальное отображение [2].

Множество аспектов человеческого лица достаточно малы и могут рассматриваться, как случайные. Например, морщины, веснушки, пятна, точное положение волос. Для повышения реалистичности изображения данные виды особенностей должны размещаться максимально случайно. Для этого используется шум, который вводится в каждый канал нейронной сети, перед операцией AdaIN и изменяет немного отображение особенностей лица, которые вводятся в соответствующих слоях (рис. 2) [2].

Генерация каждого лица в данной системе организована таким образом, что множество биометрических особенностей приближено к случайному. Учитывая введение шума в каждом слое нейронной сети, который отвечает за добавление определенных особенностей на генерируемое изображение, можно сделать вывод, что каждый биометрический эталон, включая мельчайшие особенности лица, будет приближен к оригинальному. Вероятность повторения такого эталона крайне мала, учитывая архитектуру нейронной сети и природу шума, вводимого после каждой операции AdaIN.

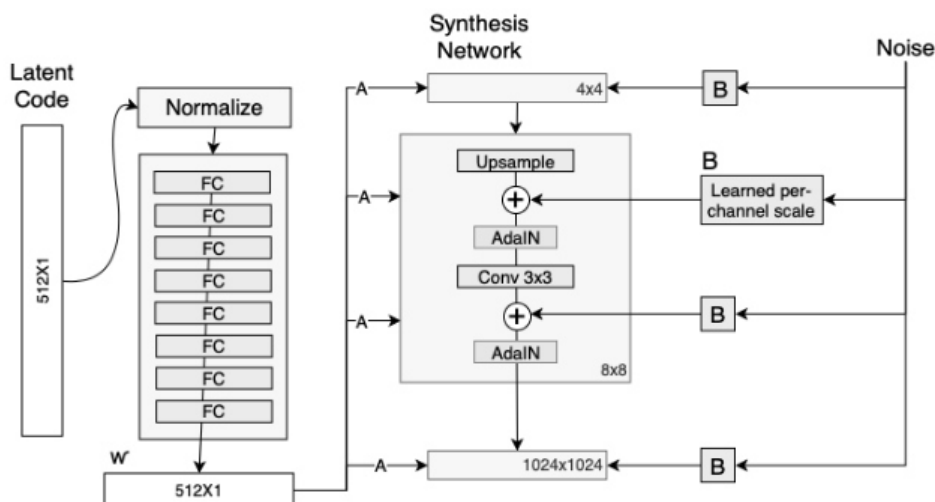


Рис. 2. Генеративно-состязательная нейронная сеть с добавлением шума
Fig. 2. Generative-adversarial neural network with the addition of noise

Для выделения биометрических эталонов с изображения лица целесообразно будет использовать один из алгоритмов распознавания лиц. Для решения задачи распознавания образов оптимальны сверточные нейронные сети [3].

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ «БИОМЕТРИЯ-КОД»

Когда набор биометрических данных для случайно сгенерированного лица будет выделен и сформирован, необходимо переводить данную совокупность биометрических характеристик в 256-битный код. Существует два приемлемых способа преобразования «биометрия – код»: нечеткие экстракторы и нейросетевые преобразователи.

Нечеткие экстракторы позволяют восстанавливать секретный ключ из неточно воспроизводимых биометрических данных [4]. Метод извлекает случайную последовательность из изначальных биометрических данных, а затем восстанавливает ее из любых данных, имеющих минимальные отличия с изначальными.

Нейросетевой преобразователь «биометрия – код» – заранее обученная искусственная нейронная сеть с большим числом входов и выходов, преобразующая частично случайный вектор входных биометрических параметров «СВОЙ» в однозначный код криптографического ключа и преобразующая любой иной случайный вектор входных данных в случайный выходной код [5]. Результатом такого преобразования будет 256-битный криптостойкий код, полученный преобразованием биометрического образа человека. Данный преобразователь наиболее оптимально использовать для получения последовательностей и ключей длиной 256 бит.

Нейросетевой преобразователь «Биометрия – код доступа» на уровне работы нейрона первого слоя (320 нейронов) может быть описан формулами

$$x_1 = \overline{M} \cdot \overline{a} \cdot \Delta = \Delta \cdot \sum_j^n M_j \cdot a_j, \quad (2)$$

$$y_1(x_1) = \frac{2}{1 + e^{-x_1}} - 1, \quad (3)$$

$$f_1(y_1) = \begin{cases} 1, & y_1 \geq 0 \\ -1, & y_1 < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где $\overline{a}$ – вектор биометрических данных;

n – количество биометрических данных в векторе $\overline{a}$;

$\bar{M}$ – вектор весовых коэффициентов, первого слоя нейронной сети, соответствующий вектору $\bar{a}$;

x_1 – результат работы сумматора нейрона первого слоя;

Δ – коэффициент использования вектора в нейроне ($\Delta = 1$, если используется в данном нейроне, в ином случае 0);

y_1 – передаточная функция первого слоя нейронной сети;

f_1 – решающее правило для нейрона первого слоя.

Второй слой данной нейронной сети состоит из 256 нейронов и принимает на вход вектор $\bar{t}$ – результирующий вектор первого слоя, состоящий из 320 элементов. Каждый нейрон второго слоя можно описать следующим образом

$$x_2 = \sum \bar{M} \cdot \bar{t} \cdot \Delta = \Delta \cdot \sum_k^{320} M_k \cdot t_k, \quad (5)$$

$$y_2(x_2) = \frac{2}{1 + e^{x_2}} - 1, \quad (6)$$

$$f_2(y_2) = \begin{cases} 1, & y_2 \geq 0 \\ -1, & y_2 < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где $\bar{M}$ – вектор весовых коэффициентов, второго слоя нейронной сети, соответствующий вектору $\bar{t}$;

x_2 – результат работы сумматора нейрона второго слоя;

Δ – коэффициент использования вектора в нейроне. ($\Delta = 1$, если используется в данном нейроне, в ином случае 0);

y_2 – передаточная функция второго слоя нейронной сети;

f_2 – решающее правило для нейрона второго слоя.

Результат работы каждого нейрона второго слоя является битом секретного криптографического ключа длиной 256 бит, генерируемого из вектора биометрических данных [6].

ВЫВОДЫ

Совокупность приведенных в данной статье технологий и решений позволяет генерировать криптостойкие ключи и псевдослучайные последовательности длиной 256 бит. Способ генерации ключевой последовательности в таком случае сводится к простому алгоритму:

- 1) генерируется случайное изображение человеческого лица нейросетью StyleGAN;
- 2) с помощью алгоритмов распознавания создается биометрический образ (вектор биометрических характеристик);
- 3) вектор биометрических характеристик подается на преобразователь «биометрия-код»;
- 4) полученный на выходе код является ключевой псевдослучайной последовательностью.

Учитывая, что таких комбинаций 2^{256} , можно сделать вывод о низкой вероятности коллизий при генерации для двух случайных лиц.

Сгенерированный таким образом ключ можно использовать в алгоритме шифрования «Кузнечик», чтобы обеспечить дополнительную криптографическую стойкость при шифровании.

Данный способ позволяет обеспечить необходимую криптостойкость псевдослучайной ключевой последовательности за счет сложной структуры нейронной сети StyleGAN и введения шумов во все каналы перед операцией AdaIN. Совокупность этих особенностей в теории также открывает дополнительные перспективы для дальнейшего улучшения данного метода путем манипуляций с видами шума и его возможной аппаратной реализацией, а также путем возможных улучшений взаимодействия компонентов системы.

Список литературы

1. Uludag U., Pankanti S., Prabhakar S. and Jain A.K. Biometric cryptosystems: issues and challenges. Proceedings of the IEEE, 2004. – Vol. 92, № 6. – P. 948–960.
2. Style-based GANs – Generating and Tuning Realistic Artificial Faces, 2018, URL: <https://www.lyrn.ai/2018/12/26/a-style-based-generator-architecture-for-generative-adversarial-networks/> (дата обращения: 13.02.2019).
3. Друки А. А. Система поиска, выделения и распознавания лиц на изображениях // Известия ТПУ. 2011. №5.
4. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data // April 13, 2004.
5. ГОСТ Р 52633-2006 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации». URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200048922> (дата обращения: 21.02.2019).
6. Гончаров С. М., Боршевников А. Е. Построение нейросетевого преобразователя «Биометрия код доступа» на основе параметров визуального вызванного потенциала электроэнцефалограммы // Доклады ТУСУР. 2014. №2 (32).

References

1. Uludag U., Pankanti S., Prabhakar S. and Jain A.K. Biometric cryptosystems: issues and challenges. Proceedings of the IEEE, 2004. – Vol. 92, № 6. – P. 948–960.
2. Style-based GANs – Generating and Tuning Realistic Artificial Faces, 2018, URL: <https://www.lyrn.ai/2018/12/26/a-style-based-generator-architecture-for-generative-adversarial-networks/> (handling date: 13.02.2019).
3. Druki A. Search, selection and face recognition system for images. Izvestiya TPU. №5, 2011.
4. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data. April 13, 2004.
5. GOST R 52633-2006 "Information protection. Information security technology. Requirements for highly reliable biometric authentication" URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200048922> (handling date: 21.02.2019).
6. Goncharov S. M., Borshevnikov A. E. Construction of a neural network Converter "Biometrics access code" based on the parameters of the visual evoked potential of the electroencephalogram. Doklady TUSUR. №2 (32), 2014.

Гончаренко Юлия Юрьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационная безопасность» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Нестеренко Владимир Романович, студент четвертого курса кафедры «Информационная безопасность» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Goncharenko Julia Jurievna, doctor of technical Sciences, associate Professor, Professor of "Information security" FSAEI HE "Sevastopol state University"

Nesterenko Vladimir Romanovich, fourth-year student of the Department "Information security" FSAEI HE "Sevastopol state University"