

Выходит один номер в год
№ 1, 2025

Учредитель
Омский государственный
технический университет

Главный редактор
П. С. Ложников,
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой
«Комплексная защита информации» ОмГТУ

Редакционная коллегия:
А. Г. Белик, канд. техн. наук
А. В. Голунов, канд. техн. наук
А. С. Голунова, канд. техн. наук
Е. И. Пастухова, канд. техн. наук
М. А. Чижик, д-р техн. наук
М. А. Шадрин, канд. техн. наук
О. П. Шафеева, канд. техн. наук
А. Г. Янишевская, д-р техн. наук

Ответственный секретарь
И. М. Чумаченко, начальник научно-
аналитического отдела ОмГТУ

Язык публикаций
русский

Дата и номер договора о включении
рецензируемого научного издания в систему
Российского индекса научного цитирования:
705-11/2013 от 20.11.2013

Адрес в РИНЦ:
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=41264

Адрес редакции:
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. Г-209
Контактный телефон:
8 (3812) 62-85-58
e-mail: ipro@omgtu.ru
Телефон для рекламодателей: 62-85-58

© ОмГТУ, 2025

Подписано в печать 08.10.2025.
Формат 60×84¹/₈. Усл. печ. л. 5,75.
Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе
в издательстве ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.
Тираж 500 экз. Заказ 342.

СОДЕРЖАНИЕ

С. Ф. Абзалова

Оценка динамики роста микроорганизмов консорциума
комбучи при добавлении кофе..... 2

И. Н. Аксентьев

Реализация трёхмерной печати разными материалами в одном
технологическом цикле способом фотополимеризации в ванне..... 7

Е. К. Беклемишева

Оценка эффективности видеоуроков по CLO 3D с помощью
разработанной системы критериев и анализа обратной связи 10

А. Г. Белик, В. Н. Цыганенко

Широтные импульсные прилегающие модели и их применение
в анализе нерегулярных потоков обслуживания 16

**В. С. Виниченко, Е. И. Пастухова,
И. А. Ибадуллаев, П. А. Батраков**

Применение виртуальных анализаторов качества
в первичной переработке нефти..... 24

Е. Р. Гутарова

Технологические и художественно-стилистические
особенности галичского кружева 29

А. В. Коротких

Оценка эффективности метрик валидации
в задачах классификации текстов 38

Н. О. Костюченко, В. Б. Косогова, С. Р. Бектимиров

Создание LSTM модели для прогнозирования аномалии..... 42

А. Ю. Лавров, Д. В. Турчанинов

Разработка системы анализа питания и классификации
заболеваний для Омского государственного медицинского
университета..... 48

А. П. Михеева, У. А. Филиппова

Получение хитозана из личинок *Hermetia illucens*
как альтернативного источника биополимера 56

А. В. Никонов, О. Г. Бородина, Ю. Г. Лагунова

Язык программирования C++ в вычислительных задачах 59

И. Н. Пожаркова, Т. А. Литвинская, Е. Ю. Трояк

Численное моделирование процессов в газовой среде
при пожаре в подземной исследовательской лаборатории..... 65

Т. Ю. Посинковский, А. С. Голунова

Распознавание типовых действий пользователя
при взаимодействии с цифровым продуктом на основе
анализа движения взгляда 71

С. М. Стажков, В. С. Ельчинский, Тунг Лам Фам

Имитационная модель ходовой части аксиально-поршневой
гидромашины с наклонным диском в среде Matlab Simulink..... 78

Я. А. Сурков, А. Б. Ионов, Г. В. Никонова

Применение характеристической функции случайного
процесса к анализу вспышки опасных конвективных явлений..... 84

С. А. Хлыстов

Сравнение технологий трехмерной печати
фотополимерными материалами 90

УДК 579.676

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-2-6

Оценка динамики роста микроорганизмов консорциума комбучи при добавлении кофе

Evaluation of microbial dynamics of kombucha consortia upon continuous backslopping in coffee

С. Ф. Абзалова

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

S. F. Abzalova

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Разнообразие вкусов и составов комбучи делает её привлекательным объектом пищевой биотехнологии. Данное исследование посвящено оценке динамики микробиологических и органолептических изменений комбучи, ферментированной в кофейном настое методом многократного переноса культуры (backslopping, BS). Основное внимание уделено характеристикам кислотности, профилям органических кислот и сахаров, а также сенсорным изменениям напитка в ходе ферментации. Результаты показали, что кофейный настой является перспективной альтернативой традиционным субстратам для производства комбучи.

Ключевые слова: комбуча, ферментированные продукты, пищевая биотехнология, кофе

Abstract. The diversity of flavors and compositions makes kombucha an attractive subject in food biotechnology. This study focuses on evaluating the dynamics of microbiological and sensory changes in kombucha fermented in a coffee infusion using the method of repeated culture transfer (backslopping, BS). Particular attention was paid to acidity parameters, profiles of organic acids and sugars, as well as sensory changes occurring during fermentation. The results demonstrated that coffee infusion is a promising alternative to traditional substrates for kombucha production.

Keywords: SCOBY, fermented products, food biotechnology, kombucha, coffee

Введение

Комбуча представляет собой ферментированный напиток на основе чая, получаемый с использованием симбиотической культуры бактерий и дрожжей (SCOBY). Современные исследования показывают возможность успешной адаптации SCOBY к нетрадиционным субстратам, включая фруктовые соки и растительные экстракты. Одним из перспективных направлений является использование кофейного настоя, богатого биоактивными соединениями и природными антиоксидантами.

Метод переноса культуры (backslopping) заключается в последовательном введении ферментированного субстрата в свежую питательную среду с целью усиления микробной активности и ускорения ферментации.

Целью данного исследования является изучение химических и сенсорных изменений комбучи, полученной на основе кофейного настоя «Cold Brew», в течение пяти циклов переноса культуры.

Материалы и методы

Приготовление кофейного субстрата

Кофейный настой был приготовлен по технологии Cold Brew из молотых кофейных зерен (100% арабика), приобретённых в местной кофейне. Заваривание производилось в холодной кипячёной воде при температуре 2–5 °C в течение 15–18 часов. Концентрация кофе составляла 51 г/л, с добавлением 10% сахарозы. Перед ферментацией настой фильтровался и пастеризовался.

Ферментация

Для ферментации использовался консорциум SCOBY, предварительно активированный в смеси чая с сахарозой. Затем в культуру были внесены молочнокислые бактерии (*Levilactobacillus brevis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Pediococcus pentosaceus*, *Companilactobacillus paralimentarius*) в концентрации 1% (1×10^7 КОЕ/мл) каждого штамма. Ферментация проводилась при 30 °C, каждый цикл BS длился 4 дня. Всего проведено 5 циклов BS, образцы отбирались ежедневно рис. 1.

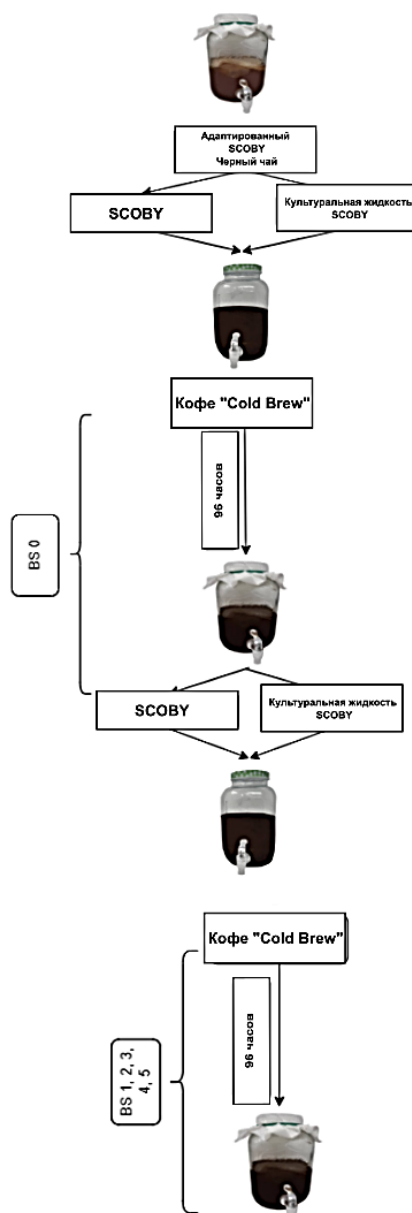


Рис. 1. Схема рабочего процесса переноса культуры (BS)

Определение pH и титруемой кислотности

Измерения pH и титруемой кислотности (ТК) проводились с использованием анализатора пищевых продуктов. Кислотность выражалась в мл 0,1 N NaOH на 1 мл напитка. Анализ органических кислот и сахаров осуществлялся методом ВЭЖХ. Органолептический анализ проводился дегустационной комиссией из 5 человек, с фиксацией профилей по 5-балльной шкале.

На протяжении пяти циклов ферментации наблюдалось постепенное снижение pH и рост титруемой кислотности, что свидетельствует об интенсификации кислотного метаболизма микроорганизмов SCOBY в кофейной среде рис. 2.

Постепенное снижение значений pH с 4.5–5.0 до 3.0–3.2 в течение 5 циклов BS указывает на умеренную активность уксуснокислых бактерий. Стабильные показатели титруемой кислотности (6.0–6.5 мл 0.1 N NaOH) подтверждают хорошие буферные свойства кофейного субстрата. Оптимальная продолжительность ферментации составляет 3–4 цикла BS (8–12 дней). Результаты графического анализа подтверждают возможность успешного использования кофе в качестве альтернативной среды для ферментации комбучи, обеспечивающей более контролируемый процесс и лучшие органолептические характеристики конечного продукта.

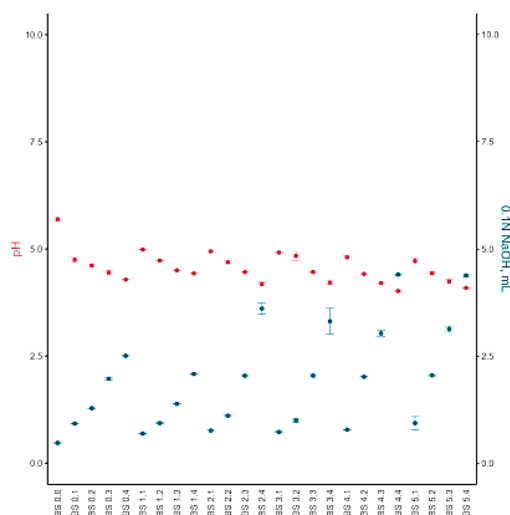


Рис. 2. Значения pH (красные точки) и титруемой кислотности (синие точки) комбучи на основе кофе во время циклов переноса культуры. Единицы титруемой кислотности – мл 0,1 N NaOH. Аббревиатура BS обозначает процесс переноса культуры. Первая цифра обозначает цикл, а вторая – день цикла

Профили органических кислот и сахаров

Основными кислотами, идентифицированными в напитке, были уксусная, лимонная и яблочная. Уксусная кислота показала наибольший прирост, достигая концентрации свыше 3 г/л к пятому циклу рис. 3.

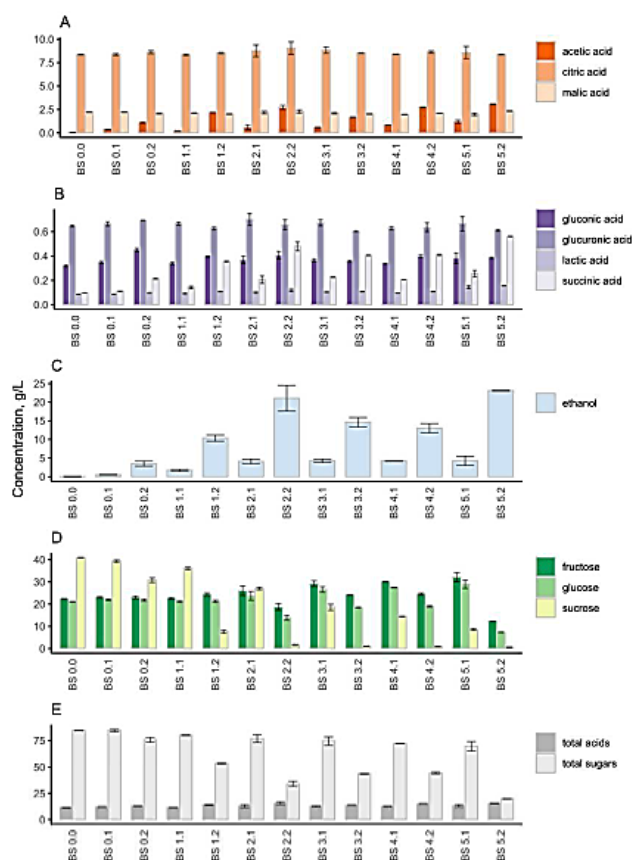


Рис. 3. Концентрации органических кислот, сахаров и этанола (г/л) в кофейной комбуче во время переноса культуры. Указаны концентрации уксусной, лимонной и яблочной кислот (А); муравьиной, глюконовой и янтарной кислот (В); этанола (С); фруктозы, глюкозы и сахарозы (D) и общие кислоты и сахара (Е)

В начале ферментации доминировала сахароза, но по мере активации ферментации её уровень снижался, уступая место глюкозе и фруктозе. Последние, в свою очередь, также уменьшались ближе к завершению каждого цикла, что свидетельствует о полном потреблении углеводов в процессе ферментации.

Этанол

Концентрация этанола увеличивалась с каждым циклом, достигая максимума в конце пятого цикла (более 20 г/л), что типично для интенсивной дрожжевой ферментации в богатой углеводами среде рис. 4.

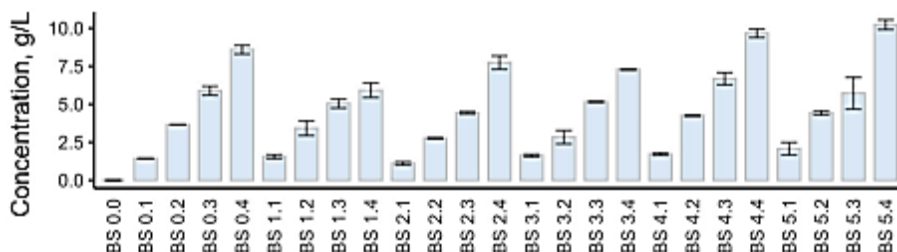


Рис. 4. Концентрация этанола по циклам

Сенсорные характеристики

Органолептический анализ показал эволюцию вкуса напитка от сбалансированного сладко-кислого к ярко выраженному кислому, горькому и газированному. Уже с третьего цикла отмечалась сильная горечь, характерная для экстрагированных кофейных соединений, дополненная кислыми и уксусными нотами табл. 1.

Таблица 1

Описания сенсорных характеристик по циклам

BS 0.1 Характерный вкус и запах кофе	BS 0.2 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус
BS 0.3 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус	BS 0.4 Сбалансированный сладкий и кислый вкус, горечь кофе была сильнее, чем на день раньше
BS 1.1 Характерный вкус и запах кофе	BS 1.2 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус
BS 1.3 Сбалансированный сладкий и кислый вкус, некоторые нотки уксусной кислоты	BS 1.4 Преобладающий кислый и горький вкус
BS 2.1 Характерный вкус и запах кофе	BS 2.2 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус, слегка газированный
BS 2.3 Преобладающий кислый и горький вкус	BS 2.4 Преобладающий кислый и уксусный вкус
BS 3.1 Характерный вкус и запах кофе	BS 3.2 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус, слегка газированный
BS 3.3 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус, слегка газированный	BS 3.4 Преобладающий кислый и очень горький вкус, газированный
BS 4.1 Характерный вкус и запах кофе	BS 4.2 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус, слегка газированный
BS 4.3 Преобладающий кислый вкус, газированный	BS 4.4 Интенсивно кислый и горький вкус, газированный
BS 5.1 Характерный вкус и запах кофе	BS 5.2 Преобладающий вкус сладкого кофе, сбалансированный сладкий и кислый вкус, слегка газированный
BS 5.3 Преобладающий кислый и горький вкус, газированный	BS 5.4 Интенсивно кислый и горький вкус, газированный

Обсуждение

Результаты исследования продемонстрировали, что кофейный Cold Brew является подходящей средой для ферментации комбучи. Нарастание кислотности и снижение сахаров указывает на успешную адаптацию микробиоты к кофейному субстрату. Повышение концентраций уксусной кислоты и этанола свидетельствует об устойчивой активности ацетобактерий и дрожжей на протяжении всех пяти циклов.

Органолептические изменения отражают эволюцию метаболитов: от приятного сладко-кислого вкуса – к ярко выраженной кислинке и горечи. Это открывает перспективы для использования кофейной комбучи в качестве функционального напитка с уникальным вкусом, особенно при контролируемой продолжительности ферментации (до 2–3 циклов).

Выводы и заключения

На основании проведённого исследования можно заключить, что ферментация кофейного Cold Brew с использованием культуры комбучи обеспечивает стабильную динамику биохимических изменений, характеризующуюся постепенным снижением pH, контролируемым ростом кислотности и образованием органических кислот. Полученные данные свидетельствуют, что комбуча в кофейной среде сохраняет удовлетворительные органолептические свойства в течение трёх циклов переноса культуры, что существенно превышает аналогичный показатель для апельсинового сока.

Особый интерес представляет способность кофейного субстрата поддерживать сбалансированный биохимический профиль ферментации, что в сочетании с уникальным составом исходного сырья открывает перспективы для создания новых видов функциональных напитков. Умеренная скорость накопления уксусной кислоты и стабильные показатели титруемой кислотности позволяют рассматривать кофе как перспективную альтернативу традиционным субстратам для производства комбучи. Полученные результаты создают научную основу для дальнейшей оптимизации технологических параметров ферментации с целью разработки продуктов с заданными функционально-технологическими и сенсорными характеристиками.

Список источников

1. Metabolic engineering of the mixed-acid fermentation pathway of *Escherichia coli* for anaerobic production of glutamate and itaconate / K. S. Vuoristo, A. E. Mars, J. V. Sangra [et al.]. DOI 10.1186/s13568-015-0147-y // *AMB Express*. 2015. Vol. 5, no. 1. P. 1–11. EDN UZDELS.
2. Characterisation of chemical, microbial and sensory profiles of commercial kombuchas / M. Andreson, J. Kazantseva, R. Kuldjärv [et. al.]. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109715 // *International journal of food microbiology*. 2022. Vol. 373. P. 109715.
3. Understanding kombucha tea fermentation: a review / S. A. Villarreal-Soto, S. Beaufort, J. Bouajila [et al.]. DOI: 10.1111/1750-3841.14068 // *Journal of food science*. 2018. Vol. 83, no. 3. P. 580–588.
4. Unraveling microbial ecology of industrial-scale Kombucha fermentations by metabarcoding and culture-based methods / M. Coton, A. Pawtowski, B. Taminiau [et al.]. DOI: 10.1093/femsec/fix048 // *FEMS microbiology ecology*. 2017. Vol. 93, no. 5. P. fix048.
5. Kombucha: A New Model System for Cooperation and Conflict in a Complex Multispecies Microbial Ecosystem / A. May, S. Narayanan, J. Alcock [et al.]. DOI: 10.7717/peerj.7565 // *PeerJ Publishing*. 2019. Vol. 7. P. e7565.
6. A review on kombucha tea—microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus / R. Jayabalan, R. V. Malbaša, E. S. Lončar [et al.] // *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2014. Vol. 13, no. 4. P. 538–550.
7. Nionelli L., Rizzello C. G. Sourdough-based biotechnologies for the production of gluten-free foods. DOI: 10.3390/foods5030065 // *Foods*. 2016. Vol. 5, no. 3. P. 65.

УДК 778.64

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-7-9

**Реализация трёхмерной печати разными материалами
в одном технологическом цикле способом фотополимеризации в ванне**

**Implementation of multi-material 3D printing
in a single technological cycle using vat photopolymerization**

И. Н. Аксентьев

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

I. N. Aksentev

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. В статье рассматривается возможность реализации многоматериальной трёхмерной печати способом фотополимеризации в ванне на стандартном LCD-принтере. Предложен ручной метод последовательной замены фотополимерных смол в ходе одного непрерывного технологического процесса. Печать осуществлялась при постоянных параметрах: толщина слоя – 0,04 мм, время экспонирования – 6 секунд. В двух сериях экспериментов реализованы переходы от стандартной смолы к ABS-like и от ABS-like к термостойкой TR-300. Замена производилась вручную после приостановки печати и промывки модели в изопропиловом спирте. Проведён анализ полученных результатов с точки зрения геометрической стабильности, сцепления слоёв и целостности изделия. Показана технологическая реализуемость метода при условии соблюдения ряда требований, включая совместимость смол по спектральной чувствительности и корректную организацию перехода. Сделан вывод о применимости метода в условиях технического прототипирования.

Ключевые слова: трёхмерная печать, фотополимеризация в ванне, смена материала, фотополимерная смола, LCD-принтер, технологический цикл, ABS-like, термостойкая смола TR-300

Abstract. The paper presents an approach to implementing multi-material 3D printing within a single technological cycle using vat photopolymerization. A manual method of sequential resin replacement during printing without interrupting the process was proposed and experimentally tested. Two cases were studied: a transition from standard resin to ABS-like resin, and from ABS-like resin to heat-resistant TR-300. The model was rinsed with isopropyl alcohol between transitions to prevent material contamination. Printing was carried out using uniform parameters: a layer height of 0.04 mm and an exposure time of 6 seconds. The results demonstrate the feasibility of the method under consistent process conditions and confirm the integrity of bonding between different resins. The approach is considered applicable to the development of functional prototypes requiring zones with different mechanical and thermal properties.

Keywords: 3D printing, vat photopolymerization, material switching, photopolymer resin, LCD printer, technological cycle, ABS-like, heat-resistant resin TR-300

Введение

Развитие аддитивных технологий сопровождается всё более широким внедрением трёхмерной печати в инженерную практику. Одной из актуальных задач, особенно в области функционального прототипирования, является создание изделий, совмещающих различные физико-механические свойства в пределах единой геометрии. Применение многоматериальной печати позволяет получить участки модели с различной жёсткостью, ударной вязкостью, термостойкостью и другими характеристиками, оптимизируя конструкцию под условия эксплуатации.

Наиболее доступными с точки зрения широкого применения в лабораторной и производственной среде являются LCD-принтеры, работающие по технологии послойной фотополимеризации. Однако конструктивные особенности таких устройств предусматривают использование единственного типа фотополимера на протяжении всего технологического цикла. Стандартное программное обеспечение и компоновка ванны не предполагают смену материала в ходе построения модели.

В статье [1] рассмотрены подходы к созданию протезов нижних конечностей с переменной жёсткостью методом аддитивного производства, в том числе за счёт реализации мультиматериальной 3D-печати. Описаны примеры использования FDM с двумя экструдерами и технологий PolyJet и MultiJet Fusion для формирования гильз протезов с жёсткими и мягкими сегментами. Особое внимание уделено анатомической адаптации и комфорту пациента за счёт распределения жёсткости, однако технологические параметры процесса печати, режимы постобработки и результаты экспериментальной оценки прочностных характеристик изделий не рассматриваются. В статье [2] представлена обширная классификация технологий аддитивного производства, применяемых

для изготовления электронных устройств, и описан подход к реализации мультиматериальной 3D-печати. Рассматриваются способы получения многослойных структур путём комбинирования различных материалов в рамках одного технологического процесса, включая использование нескольких экструдеров, ванн с фотополимерами и различных чернил. Приводятся примеры реализации структур, состоящих из чередующихся диэлектрических и проводящих слоёв, однако экспериментальные данные по физико-механическим характеристикам полученных изделий и параметры технологического процесса не приводятся.

В данной работе предлагается простой метод последовательной смены фотополимерной смолы вручную в процессе печати, без модификации оборудования и с сохранением геометрической непрерывности изделия. Цель исследования заключается в подтверждении технологической реализуемости многоматериальной печати на LCD-принтере путём последовательной смены фотополимерных смол без прерывания цикла, с сохранением геометрической точности и прочности соединения материалов.

Теория

Процесс трёхмерной печати способом фотополимеризации в ванне предполагает поэтапное формирование модели путём последовательной экспозиции жидкой фотополимерной смолы через маску ЖК-дисплея при воздействии ультрафиолетового излучения. Каждый слой модели полимеризуется на поднимающейся платформе, обеспечивая послойное построение изделия. В базовой реализации технология предполагает использование одного типа смолы на протяжении всего цикла.

Рассматриваемая методика основана на возможности принудительной остановки печати на определённой высоте и замене фотополимера вручную. После замены материал продолжает полимеризоваться в тех же условиях, без изменения положения. Таким образом, обеспечивается последовательное формирование участков модели из разных материалов.

Ключевым условием успешности метода является предотвращение смешивания фотополимеров в переходной зоне. Для этого в ходе экспериментов применялась предварительная промывка нижней части модели в изопропиловом спирте. Такой подход обеспечивает удаление остаточной смолы с поверхности и снижает вероятность загрязнения нового материала. Переход между смолами планировался на участке модели с увеличенной площадью поперечного сечения, что обеспечивает большую площадь контакта и способствует повышению прочности сцепления.

Используемые материалы обладают сопоставимыми условиями отверждения, что позволило сохранить единые параметры печати: высоту слоя 0,04 мм и экспозицию 6 секунд на слой. В качестве материалов выбраны три вида смолы: стандартная фотополимерная смола общего назначения, ABS-like смола и термостойкая смола TR-300. Все материалы совместимы по условиям отверждения и не требуют индивидуальной перенастройки режима печати.

Результаты

Первый эксперимент был направлен на проверку сцепления стандартной и ABS-like смолы. В САПР «Компас-3D» разработана модель цилиндра диаметром 20 мм и высотой 100 мм. Печать велась из стандартной смолы до высоты 50 мм. После достижения указанной высоты печать была приостановлена. Из ванны удален первый материал и добавлен следующий. Печать продолжалась до завершения. Визуальный осмотр модели показал отсутствие дефектов в зоне перехода. Граница материалов различима по цвету, однако геометрически модель осталась непрерывной.

Во втором эксперименте исследовалась возможность перехода от ABS-like смолы к термостойкой TR-300. В качестве тестовой геометрии использовалась деталь технически-производственного назначения, имеющая утолщение в средней части, выбранное как зона перехода. После завершения печати нижней части из ABS-like смолы, модель была промыта изопропиловым спиртом и произведена замена смолы на TR-300. Печать завершалась в штатном режиме. Визуально переход не сопровождался деформациями, геометрия изделия сохранялась.

Нарушений геометрии, расслоений или нарушений структуры в зоне контакта смол не обнаружено. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность последовательной печати разными материалами с сохранением качества изделия.

Выводы и заключение

Цель исследования, заключающаяся в подтверждении технологической реализуемости многоматериальной печати с сохранением точности и прочности, достигнута. Результаты экспериментов показали, что смена фотополимерной смолы в процессе печати возможна без нарушения технологической непрерывности, при условии промывки модели и использования совместимых материалов. Предложенный метод позволяет изготавливать изделия, содержащие участки с различными характеристиками, включая повышенную термостойкость или прочность, без дополнительных сборочных операций.

Перспективами дальнейшей работы являются количественные испытания прочности соединения, разработка рекомендаций по геометрии переходных зон, а также проработка алгоритмов автоматизации процесса смены смолы в рамках одного технологического цикла.

Список источников

1. Обзор применения аддитивных технологий в медицине: перспективы функционально-градиентных полимеров в протезировании нижних конечностей / А. Э. Абдрахманова, А. В. Сотов, А. И. Зайцев, А. А. Попович. DOI: 10.18721/JEST.29405 // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 83–96. EDN OJLYYT.
2. Толочко Н., Ланин В. Л. 3D-печать в электронике. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.124.132 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. № 6 (197). С. 124–133. EDN XXSKLZ.

УДК 371.315.2

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-10-15

**Оценка эффективности видеоуроков по CLO 3D с помощью
разработанной системы критериев и анализа обратной связи**

**Evaluation of the effectiveness of CLO 3D video lessons
using the developed system of criteria and feedback analysis**

Е. К. Беклемишева

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

E. K. Beklemisheva

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. В статье представлены результаты оценки эффективности видео-уроков по CLO 3D с использованием разработанной системы критериев и анализа обратной связи от обучающихся. В работе рассматриваются различные факторы, влияющие на восприятие учебного материала, такие как уровень подготовки студентов, соответствие содержания видео-уроков образовательным требованиям и практическая значимость получаемых знаний. Оценка проводится с учетом мнений как новичков, так и продвинутых пользователей программы. Результатом исследования является разработка рекомендаций, направленных на улучшение качества видео-уроков и повышение их эффективности для различных категорий студентов. Материалы статьи могут быть полезны в области образовательных технологий и дизайна одежды, а также для специалистов, работающих в сфере обучения программам 3D-моделирования и виртуальной реальности.

Ключевые слова: видео-уроки, CLO 3D, система критериев оценки, обратная связь, образовательные технологии, 3D-моделирование

Abstract. This article presents the results of evaluating the effectiveness of CLO 3D video lessons using a developed system of criteria and feedback analysis from learners. The study examines various factors influencing the perception of educational material, such as the students' level of preparedness, the alignment of the video lessons' content with educational requirements, and the practical relevance of the knowledge gained. The evaluation takes into account the opinions of both beginners and advanced users of the program. The outcome of the research is the development of recommendations aimed at improving the quality of video lessons and enhancing their effectiveness for different categories of students. The materials of the article may be useful in the field of educational technologies and fashion design, as well as for specialists working in the area of training for 3D modeling and virtual reality software.

Keywords: video lessons, CLO 3D, evaluation criteria system, feedback, educational technologies, 3D modeling

Введение

В современном мире моды 3D-визуализация одежды становится все более востребованной. Программа CLO 3D предлагает широкие возможности для создания реалистичных визуальных образов и упрощает процесс разработки одежды [1]. Однако, владение этой программой требует специальных знаний и навыков. Видео-уроки представляют собой эффективный инструмент для обучения работе в CLO 3D, но их качество и эффективность могут варьироваться в зависимости от уровня подготовки обучающихся.

Данное исследование направлено на улучшение качества образовательного контента в сфере онлайн-образования, основываясь на анализе обратной связи.

Цель исследования заключается в выборе методики оценки видео-уроков по изучению программы CLO 3D, учитывающей разные уровни подготовки обучающихся (новички и продвинутые студенты), с целью выявления эффективности обучения и получения обратной связи.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- разработать систему критериев оценки видео-уроков по изучению CLO 3D;
- провести экспертную оценку видео-уроков по выбранной методике;

- собрать обратную связь от обучающихся о восприятии видео-уроков;
- проанализировать полученные данные и выявить факторы, влияющие на эффективность обучения с помощью видео-уроков;
- сформулировать рекомендации по улучшению видео-уроков для студентов с разным уровнем подготовки.

Объектом исследования являются видео-уроки по CLO 3D. Предмет исследования – система критериев оценки эффективности этих видео-уроков и получение обратной связи от обучающихся.

Теория

Для оценки видео-уроков по изучению программы CLO 3D использовался комбинированный метод [2], состоящий из формальных критериев и обратной связи.

Каждый просмотренный видео-урок оценивался по следующим критериям:

- 1) Понятность и доступность изложения (ясный и четкий язык, логическая последовательность, использование понятных терминов);
- 2) Качество информации (актуальность, точность, полнота информации, отсутствие ошибок);
- 3) Практическая ценность (наличие практических примеров, пошаговых инструкций, закрепление материала);
- 4) Качество видео (четкость изображения, отсутствие лишнего в кадре, яркость и контрастность);
- 5) Качество звука (четкость и разборчивость звука, отсутствие шумов и искажений, уровень громкости);
- 6) Визуальная картинка (привлекательность и соответствие теме);
- 7) Качество преподавателя (компетентность, взаимодействие с аудиторией, уверенность в голосе).

Критерии оценивались по 5-ти балльной шкале, где:

- 1 балл – неудовлетворительно;
- 2 балла – удовлетворительно;
- 3 балла – хорошо;
- 4 балла – отлично;
- 5 баллов – превосходно.

Получается, что максимальное количество баллов, которое может набрать один виде-урок – 35 баллов. Оценки от 24 до 35 баллов свидетельствуют о высоком качестве видео-урока, оценки от 12 до 23 баллов свидетельствуют о среднем качестве видео-урока и оценки от 1 до 11 баллов свидетельствуют о низком качестве видео-урока.

Для исследования выбраны 10 участников и 3 видео-урока, которые они оценивали по заданным критериям. Применение единых критериев обеспечивает унификацию оценки и позволяет сравнить результаты разных видео-уроков.

Метод обратной связи заключался в том, что студентам предлагалось выполнить задание, показанное в видео-уроке на заданную тему (например, создание складок, сшивание деталей и получение лекал методом обводки по фото), и зафиксировать время, которое ушло на его реализацию. Далее время, затраченное студентом на выполнение задания сравнивалось с временем, показанным в видео-уроке с целью определения корреляции между ними [3].

Среди выбранных десяти участников есть как новички, участники среднего уровня, так и профессионалы в 3D-моделировании одежды. Длительность видео-уроков:

- «Получение лекал методом обводки по фото» – 5 минут и 41 секунда = 341 секунда;
- «Создание складок» – 3 минуты и 51 секунда = 231 секунда;
- «Инструменты по сшиванию деталей» – 4 минуты и 3 секунды = 243 секунды.

Результаты

Результаты оценки критериев видео-урока «Инструменты по сшиванию деталей» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка критериев видео-урока «инструменты по сшиванию деталей»

Критерий	Оценки, присвоенные участниками										Средняя оценка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Понятность и доступность изложения	3	5	5	5	5	4	5	5	4	5	4,6
Качество информации	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	4,8
Практическая ценность	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	4,8
Качество видео	5	5	5	5	5	3	4	4	5	5	4,6
Качество звука	5	5	5	5	5	4	4	5	5	5	4,8
Визуальная картинка	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	4,7
Качество преподавателя	4	5	5	4	5	4	4	5	4	4	4,4

Результаты оценки критериев видео-урока «Инструменты для сшивания деталей» получили высокие баллы по большинству критериев. Особенно сильны такие критерии, как «качество информации» (4,8), «практическая ценность» (4,8) и «качество звука» (4,8). Это указывает на полезность и точность материала. Однако есть несколько моментов для улучшения следующих критериев:

- «качество преподавания» (4,4) оценивается ниже, что может указывать на необходимость улучшения подачи материала или выразительности преподавателя;
- «понятность и доступность изложения» (4,6) и «качество видео» (4,6) также могли бы быть немного улучшены.

В целом, видео является качественным, но можно улучшить преподавательские навыки и некоторые технические детали. Общая оценка видео-урока 32,7 балла. Эта оценка является высокой.

Результаты оценки критериев видео-урока «Получение лекал методом обводки по фото» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка критериев видео-урока «получение лекал методом обводки по фото»

Критерий	Оценки, присвоенные участниками										Средняя оценка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Понятность и доступность изложения	5	5	5	5	4	3	4	4	3	5	4,3
Качество информации	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	4,3
Практическая ценность	4	5	5	5	5	4	5	4	5	5	4,7
Качество видео	5	5	5	5	5	4	3	5	5	5	4,7
Качество звука	5	5	5	5	5	3	4	4	4	5	4,5
Визуальная картинка	5	5	5	4	5	5	4	3	3	5	4,4
Качество преподавателя	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4,2

Оценка критериев видео-урока «Получение лекал методом обводки по фото» имеет смешанные результаты, но в целом, получила хорошие баллы:

- критерии «понятность и доступность изложения» (4,3), «качество информации» (4,3) и «визуальная картинка» (4,4) оцениваются на уровне «хорошо», это может свидетельствовать о том, что материал не всегда подается достаточно ясно и, возможно, есть трудности с восприятием некоторых моментов;
- критерии «практическая ценность» (4,7), «качество видео» (4,7) и «качество звука» (4,5) получили высокие оценки, что говорит о полезности и хорошем качестве демонстрации учебного материала;
- критерий «качество преподавания» (4,2) – наименьшая оценка, что указывает на необходимость улучшения подачи материала или выразительности преподавателя.

В целом, видео-урок полезный и с хорошим техническим качеством, но требуется улучшить ясность изложения и выразительность преподавателя. Общая оценка высокая – 31,1 балл.

Результаты оценки критериев видео-урока «Создание складок двумя способами» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка критериев видео-урока «создание складок двумя способами»

Критерий	Оценки, присвоенные участниками										Средняя оценка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Понятность и доступность изложения	4	5	5	5	4	5	4	4	3	5	4,4
Качество информации	5	5	5	5	5	3	5	3	3	5	4,4
Практическая ценность	5	5	5	4	5	3	5	4	4	5	4,5
Качество видео	5	5	5	4	5	4	4	4	4	5	4,5
Качество звука	5	5	5	5	5	5	3	3	5	5	4,6
Визуальная картинка	5	5	5	5	5	3	5	3	5	5	4,6
Качество преподавателя	5	5	5	4	4	3	3	4	3	4	4,0

Видео-урок «Создание складок» получил хорошие оценки по большинству критериев:

- критерии «понятность и доступность изложения» (4,4) и «качество информации» (4,4) имеют хорошие баллы, но есть небольшие недостатки в области объяснения материала;
- критерии «практическая ценность» (4,5), «качество видео» (4,5), «качество звука» (4,6) и «визуальная картинка» (4,6) получили высокие баллы, что говорит о хорошем техническом исполнении и полезности учебного контента;
- критерий «качество преподавания» (4,0) имеет самую низкую оценку, что указывает на необходимость улучшения подачи материала (например, темпа или выразительности).

В целом, видео-урок является полезным и качественным, но преподавание требует улучшений для более эффективного восприятия материала. Общая оценка 31 балл – высокая.

Результаты оценки анализируемых видео-уроков показывают высокое качество материалов в большинстве аспектов. Видео демонстрируют полезность информации, практическую ценность и технические параметры (качество видео, звука, визуальной картинки), что подтверждается высокими баллами в этих критериях (4,5–4,8). Эти элементы свидетельствуют о том, что контент полезен, понятен и технически выполнен на хорошем уровне [4].

Однако, несмотря на высокие оценки, есть некоторые области, требующие улучшения. В частности, подача материала и качество преподавания получили несколько более низкие баллы (4,0–4,4), что указывает на необходимость улучшения выразительности преподавателя, темпа изложения или взаимодействия с аудиторией, чтобы сделать уроки более увлекательными и понятными для зрителей.

Результаты временных затрат представлены в табл. 4.

Таблица 4

Временные затраты на выполнение действий из видео-уроков по 3d-моделированию одежды

Название видео-урока	Время выполнения урока участником, мин										Общее среднее время	Среднее время у новичков	Среднее время у среднего уровня	Среднее время у профи
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
«Инструменты по шиванию деталей»	7,5	7,0	10,0	15,0	4,0	7,3	6,4	8,7	4,5	10,0	8,0	8,8	8,5	5,5
«Получение лекал методом обводки по фото»	18,0	20,0	15,0	40,0	25,0	16,1	16,7	23,6	16,2	16,0	20,7	27,7	18,1	16,5
«Создание складок»	15,0	7,0	15,0	11,0	17,0	12,0	9,4	13	7,3	12,0	11,9	14,3	11,8	8,4
Уровень участника	новичок	средний	средний	новичок	новичок	средний	профи	средний	профи	средний	–	–	–	–

Проанализировав временные затраты участников на выполнение заданий, можно сказать следующее: участники начального уровня, в среднем, тратят в 4 раза больше времени относительно длительности видео-уроков, что связано с их необходимостью усвоить и повторить материал, а также с меньшей уверенностью в выполнении практических действий. В трех видео-уроках время, затраченное ими на выполнение задач, значительно превышает время, затраченное более опытными участниками.

По сравнению с новичками, участники среднего уровня тратят в 3 раза больше времени, а профессионалы от 1,26 до 2,83 раза больше времени на повторение действий из видео-уроков. Это говорит о том, что они обладают более глубокими знаниями и им легче дается выполнение заданий.

Результаты показывают, что некоторым участникам не все моменты были понятны в видео-уроках. Об этом свидетельствует обратная связь, полученная от них.

Например, в видео-уроке «Инструменты по сшиванию деталей» нет результата надевания сшитого изделия на манекен. В видео-уроке «Получение лекал методом обводки по фото» часто тишина в кадре, нет подробных пояснений по точкам в областях большой кривизны, так же нет информации по перемещению точек и не показано как получены измерения обхвата талии аватара. В видео-уроке «Создание складок» нет информации по созданию прямоугольников и плохо видны их размеры. Многие участники не совсем поняли, как вызвать окно «разделить линию» (нет подробных пояснений). Кроме того, многие на моменте 3 минуты 20 секунд потерялись, так как не было сказано, что сначала нужно выделить складку, а потом нажать правую кнопку мыши.

Для того, чтобы в дальнейшем у участников курса не возникало трудностей, все эти моменты будут учтены для усовершенствования видео-уроков.

Обсуждение результатов

Анализ результатов исследования позволил выделить несколько факторов, влияющих на эффективность видео-уроков по 3D-визуализации одежды:

- 1) технические параметры (видео, звук);
- 2) структура контента;
- 3) подача учебного материала преподавателем;
- 4) разный уровень подготовки участников.

Кроме того, составлены рекомендации по улучшению эффективности видео-уроков:

- использовать видео с высоким разрешением, чтобы все детали, связанные с процессом 3D-визуализации (например, работа с инструментами в программе), были хорошо видны;
- обеспечить качественное звучание и минимизировать фоновый шум, чтобы объяснения преподавателя были хорошо слышны;
- увеличить масштаб изображения в некоторых видео, обеспечив более четкое отображение мелких деталей работы в программе;
- рассмотреть возможность использования дополнительных графических элементов, таких как аннотации или подсказки на экране, для выделения ключевых моментов;
- сделать более подробные пошаговые инструкции, особенно для сложных этапов работы, это особенно актуально для новичков, которые могут не всегда понимать процесс или логику выполнения задания;
- разработать дополнительные видео-уроки с разбором наиболее сложных моментов, чтобы студенты могли быстро перейти к ним при необходимости;
- замедлить темп изложения материала, следить за тем, чтобы каждый этап был понятен и логично переходил в следующий;
- повысить выразительность речи, обратить внимание на темп изложения, добавить больше комментариев и пояснений на сложных этапах,
- сделать уроки более динамичными и увлекательными, добавив элементы интерактивности, например, вопросы для самоконтроля или упражнения, которые учащийся может выполнять во время просмотра;
- рассмотреть возможность использования технологий, таких как экранные аннотации или субтитры, чтобы дополнительно объяснять сложные моменты на экране;

- создать адаптивную систему обучения, которая будет учитывать различия в уровне подготовки студентов;

- доснять необходимый материал с более подробным объяснением;

- перезаписать звук видео-уроков в некоторых моментах.

Реализация предложенных рекомендаций позволит сделать онлайн-курс более доступным, понятным и привлекательным для студентов с разным уровнем подготовки.

Выводы и заключение

В ходе проведённого исследования были проанализированы результаты оценки видео-уроков по 3D-моделированию одежды участниками с разным уровнем подготовки: начальным, средним и профессиональным. Оценка видео-уроков по заранее установленным критериям, а также замеры времени, затрачиваемого на повторение последовательности действий, позволили получить данные о том, какие элементы в видео требуют доработки для повышения эффективности обучения [4].

Результаты исследования показали, что участники с более низким уровнем подготовки (начальным и средним) испытывали трудности с восприятием некоторых моментов, что повлияло на скорость выполнения задач. Участники с профессиональным уровнем подготовки, наоборот, продемонстрировали высокую скорость выполнения заданий, что свидетельствует о важности продуманной структуры видео-уроков для более опытных пользователей.

Анализ времени, затраченного на выполнение каждого задания, показал, что ключевыми факторами, влияющими на эффективность обучения, являются чёткость инструкций, наличие дополнительных пояснений и возможность медленного прогресса для новичков.

Результаты данного исследования служат основой для дальнейшего улучшения структуры и формата видео-уроков, что, в свою очередь, поможет повысить их эффективность и доступность для разных категорий учащихся.

Источник финансирования. Благодарности

Научный руководитель Е. В. Евдущенко, доцент, к.т.н., Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия.

Список источников

1. Салахов Р. Ф., Салахова Р. И., Галиуллина А. Г. Перспективы и возможности программы CLO 3D и художественного проектирования одежды в процессе обучения студентов // Вестник Казанского государственного университета культуры и искусств. 2024. № 2. С. 26–32.

2. Карасев О. И., Муканина Е. И. Метод экспертных оценок в форсайт-исследованиях // Статистика и экономика. 2019. Т. 16, № 4. С. 4–13.

3. Инструмент обратной связи. URL: https://www.profiz.ru/stup/11_2021/obrat_svyaz/ (дата обращения: 03.04.2025).

4. Потупчик Е. Г., Чен Ю. В. Особенности оценки качества урока в условиях использования ЦОР и дистанционных технологий // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева. 2020. № 3 (53). С. 62–70.

УДК 004.046

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-16-23

**Широтные импульсные прилегающие модели и их применение
в анализе нерегулярных потоков обслуживания**

**Width-based impulse adjacent models and their application
in the analysis of irregular service flows**

А. Г. Белик, В. Н. Цыганенко

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

A. G. Belik, V. N. Tsyganenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Предлагается и обсуждается применение методологии моделирования потоков обслуживания регулярными прилегающими импульсными сигналами в задачах оценивания свойств и анализа динамических процессов. Определены методические правила построения прилегающих импульсных последовательностей на основе расчета частотных и широтных параметров прямоугольного сигнала в условиях нерегулярности потоковых операций обслуживания. Представлены и исследованы особенности и возможности использования представленной методики в прикладных задачах анализа степени нерегулярности типовых потоков в системах массового обслуживания. Результаты исследований показали целесообразность и перспективность применения метода в различных прикладных задачах исследования поведения динамических систем и оптимизации их управления.

Ключевые слова: поток обслуживания, прямоугольный импульс, сигнал, альтернанс, нерегулярность, сигнал, процесс, динамика, моделирование, прилегающий элемент, анализ

Annotation. The study explores a modeling approach for service flows that utilizes regular adjacent impulse signals, aiming to support the estimation of system properties and the analysis of dynamic processes. Methodological guidelines are proposed for constructing adjacent impulse sequences based on the calculation of frequency and width parameters of rectangular signals under conditions of irregular service operations. The study examines the features and applicability of the proposed method in typical applied problems involving the assessment of flow irregularity in queuing and mass service systems. The findings demonstrate the feasibility and effectiveness of this approach for various practical tasks related to the analysis of dynamic system behavior and the optimization of control mechanisms.

Keywords: service flow, square pulse, signal, alternance, irregularity, signal, process, dynamics, modeling, adjacent element, analysis

Введение

Анализ потоковых систем массового обслуживания представляет собой один из наиболее распространенных видов исследования динамических процессов, связанного с оценкой нерегулярных последовательностей временных интервалов переменной величины, отражающих обслуживания – операции, платежи и иные виды работы, имеющие длительность. При этом характер событий начала и окончания обслуживания может быть различным, как однородным, так и неоднородным. В целом аналитические исследования в задачах данного рода направлены на установление степени, закономерностей и тенденций нерегулярности потока. Так как нерегулярность потока обслуживания может носить совместный систематический и случайный характер, то часто приходится исследовать отдельное влияние этих двух факторов. Поток обслуживания с формальной точки зрения представляется импульсным сигналом (обычно прямоугольным) с переменными длительностями импульсов и интервалами между ними.

Для оценки степени нерегулярности потока импульсов могут использовать методы двух основных классов – статистические и моделирования регулярными сигналами. Если первый подходит для нахождения статистических показателей нерегулярности для заданного последовательного набора импульсов, то второй позволяет определять локальные особенности и участки проявляемой неравномерности и формировать оценки нерегулярности при помощи параметров модельного сигнала, в особенности частоты и длительности импульса. Одним из способов параметрического анализа потоков импульсов является прикладное прилегающее моделирование [1, 2], которое применимо как для амплитудного исследования аналогового или дискретного сигнала, так и для частотного и широтного (по длительности) анализа импульсных последовательностей, которыми на практике повсеместно отображаются потоки событий и обслуживания. Так в работе [3] предложен метод частотного

импульсного прилегающего моделирования, который на основе последовательного чередования импульсов регулярной модели и событий позволяет выявлять участки потоков событий с возможным или невозможными заменами регулярного частотного сигнала, а также получать наибольшие и наименьшие значения периодов (частот) на альтернансным интервалах, при помощи которых можно наглядно и просто оценивать степень нерегулярности исследуемого потока событий. Для обозначения такого чередования импульсов первичного потока и моделирующего сигнал в [3] используется термин импульсного альтернанса, который в данной статье будем называть просто альтернансом.

Естественным развитием методологии [3] является прилегающее импульсное моделирование с использованием не только периода следования, но и длительности импульсов (ширины). При помощи такого моделирования становятся возможными разноплановые исследования потоков обслуживания, характерных для самых разных областей применения – изучение пропускной способности дорог, доставки товаров, трафика в компьютерных сетях, банковских платежей, торгового и производственного операционного обслуживания и многих других.

Импульсное прилегающее моделирование нерегулярных потоков событий

Если поток событий рассматривается как последовательный числовой ряд, представляющий собой временные метки или интервалы между ними, что дает возможность представить его в виде импульсного сигнала дельта-вида, то поток обслуживаний, каждое из которых представляется парой значений – начала и длительности обслуживания, требует использования прямоугольного импульсного сигнала с целью исследования его параметров, в первую очередь частоты (или расстояния между импульсами) и ширины. Предполагая, что эти параметры последовательности импульсов изменяются, то их оценивание и анализ дает как правило важную информацию для нахождения закономерностей в поведении потока событий и их прогнозирования.

В простейшем варианте прямоугольное импульсное моделирование может использовать для анализа потоков событий, в частности с применением подходов прилегающего моделирования [3]. Принципы такого моделирования основаны на импульсном альтернансном чередовании совмещаемых потоковых событий и регулярных импульсов, как показано на рис. 1. При этом обеспечивается совмещение каждого события с соответствующим импульсом, а фронты импульсов, как передний, так и задний располагаются в промежутках между событиями, которые формально могут быть представлены дельта-импульсами.

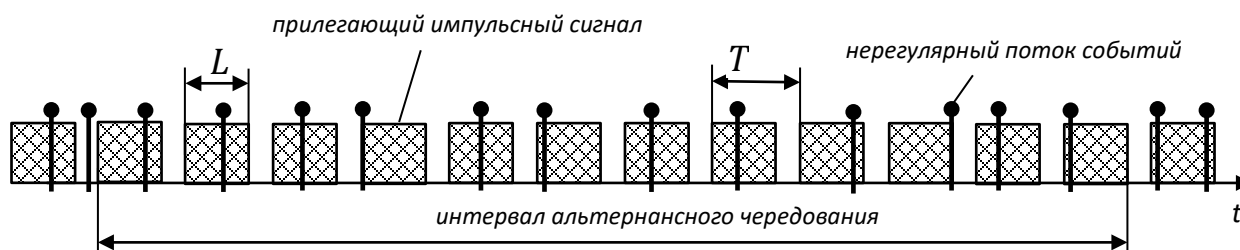


Рис. 1. Широтная импульсная прилегающая модель нерегулярного потока событий

Поскольку интервалы между событиями являются переменными и стохастическими, то в зависимости от степени разброса значений этих интервалов в порядке следования событий могут существовать участки с разным количеством чередующихся импульсов и событий при соблюдении правила их соответствия «одно событие-один импульс». Таким образом длина участка чередования (альтернансный интервал) становится одним из ключевых показателей нерегулярности потока событий. Для некоторой произвольной последовательности событий этот показатель может быть представлен такими частными характеристиками, как наибольший и наименьший альтернансный интервал, их количество в общей последовательности и так далее.

Следует отметить, что статистические методы оценки неравномерности следования событий дают конечно важнейшую статистическую информацию, однако они обрабатывают статистические числовые выборки, в которых невозможно исследовать локализацию неравномерностей и тенденции по изменению динамики событийных процессов, что наиболее объективная оценка характера потока событий обеспечивается дополняющими друг друга статистическими показателями и параметрами прилегающего моделирующего сигнала.

Кроме интервальной оценки зон равномерности (неравномерности), импульсный прямоугольный сигнал несет еще и дополнительную информации, характеризующую нерегулярность потока событий уже внутри интервала альтернансного чередования, помимо частотных параметров, определенных в [3] – разности между наибольшей и наименьшей частотой следования импульсов (или периодов между ними), введение длительности импульса как параметра делает его информативной характеристикой, свидетельствующей о степени нерегулярности потока событий, определяющей как бы максимальную зону неопределенности фактически для каждого импульса.

Прямоугольный импульсный сигнал как опорная модель дает также возможность исследования характера нерегулярности следования уже не событий, возникающих в отдельные моменты времени, а обслуживаний, определяемыми парными моментами начала и завершения операции. Такое моделирование представляет интерес при исследовании систем массового обслуживания, где оценка нерегулярности является одним из важнейших факторов системного управления объекта, генерирующего или производящего операционное обслуживание. Введение длительностей обслуживания заметно усложняет методологические основы построения прилегающих импульсных моделей вследствие появления второго нерегулярного фактора исходной последовательности обслуживаний – длительности. Рассмотрим далее эти аспекты подробнее.

Методические основы импульсного прилегающего моделирования потока обслуживания

Рассмотрим сначала основные правила и зависимости, определяющие формальную процедуру построения прямоугольной импульсной прилегающей модели применительно к потоку событий, которые будем определять как дельта-импульсы. Наименьшей совокупностью таких событий является триада с временными отметками t_0 , t_1 и t_2 (рис. 2).

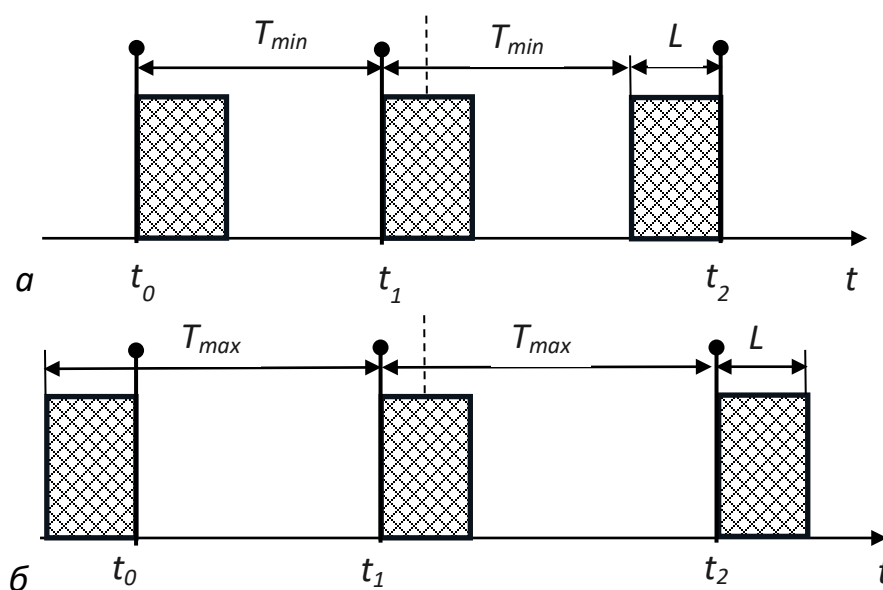


Рис. 2. Простейшая широтная импульсная прилегающая модель триады событий
(*a* – наименьшая, *б* – наибольшая)

Такая упрощенная модель позволит нам установить основные зависимости и правила для моделирования исходя из следующих соображений:

1) крайние события триады представляют собой моменты начала и окончания альтернансного интервала так как это установлено в [3], что позволяет определить предельные периоды следования импульсов, наибольший и наименьший, как для триады, так и для произвольной совокупности событий в этом диапазоне;

2) наименьший период следования T_{min} при этом находится исходя из внутреннего касания крайних событий t_0 и t_2 наименьшей прилегающей последовательностью прямоугольных импульсов, как показано на рис. 2, а;

3) наибольший период следования T_{max} находится исходя из внешнего касания тех же крайних событий t_0 и t_2 наибольшей прилегающей последовательностью прямоугольных импульсов, как показано на рис. 2, б;

4) промежуточное событие t_1 может рассматриваться как одно из всей совокупности внутренних событий рассматриваемого альтернансного интервала, что позволяет интерпретировать правила и зависимости для построения соответствующей прилегающей импульсной модели, наибольшей или наименьшей.

Для формирования регулярного импульсного сигнала, моделирующего чередующуюся последовательность событий, необходимо знать три основные расчетные зависимости: условие существования чередующейся с событиями последовательности прямоугольных импульсов, периоды (частоты) следования наибольшей T_{max} и наименьшей T_{min} последовательности исходя из правил альтернансного прилегания, а также длительность L . Для триады положения крайних импульсов исходя из внешнего и внутреннего прилегания определяют совмещаемыми с событиями t_0 и t_2 фронтами, а промежуточный импульс, для триады средний, совмещаемый с событием t_1 . Так центра среднего импульса находится посередине между крайними, то влияющим фактором на расчетные характеристики триады является смещение события t_1 относительно этого центра. Таким образом можно установить условия существования U_{min} , U_{max} триады импульсов для наименьшей и наибольшей модели соответственно следующими логическими выражениями:

$$U_{min} = 1/3 (t_2 - t_0) < (t_1 - t_0) < 2/3 (t_2 - t_0)$$

$$U_{max} = 0 < (t_1 - t_0) < (t_2 - t_0).$$

Длительность импульсов одинакова для наименьшей и наибольшей модели и рассчитывается формулой

$$L = |t_0 + t_2 - 2t_1|,$$

а периоды следования определяются зависимостями

$$T_{min} = (t_2 - t_0 - L)/2$$

$$T_{max} = \max(t_1 - t_0, t_2 - t_1).$$

Если переходить от триады к произвольной последовательности событий внутри альтернансного интервала, то условия существования, длительность и период следования прямоугольных импульсов будут определять по одному внутреннему событию из многих, для которого отклонение от центра соответствующего ему импульса будет максимальным, при этом, конечно, нужно учитывать его порядковое положение в потоке событий.

Методические основы импульсного прилегающего моделирования потока обслуживаний

Рассмотрим далее, не теряя общности импульсного прилегающего моделирования, методические основы построения широтной регулярной модели для потока обслуживания. Обслуживание, в отличие от события, определяется не одним, а парой временных меток: t – начало обслуживания, и v – его завершение, $v > t$. Наличие парных событий t и v приводит к необходимости использовать их при определении границ альтернансного интервала. Так, как показано на рис. 3 на примере импульсной триады обслуживания, моделируемой регулярной тройкой прямоугольных импульсов, для определения альтернансного интервала наименьшей модели используются метки t_0 и v_2 , а для альтернансного интервал наибольшей модели метки v_0 и t_2 .

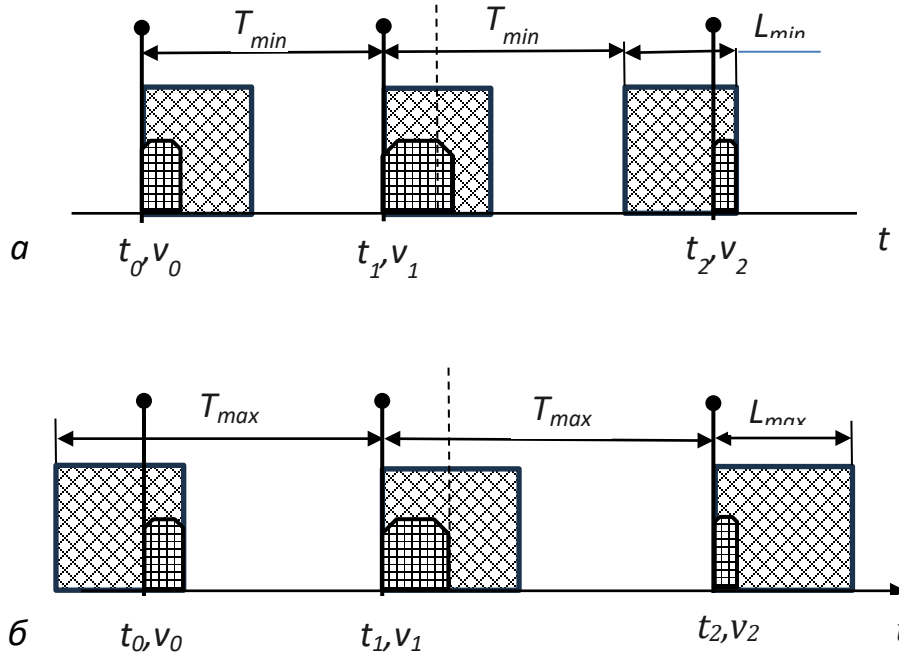


Рис. 3. Простейшая широтная импульсная прилегающая модель триады обслуживания
(а – наименьшая, б – наибольшая)

Тогда условия существования наименьшей U_{min} и наибольшей U_{max} моделей регулярных импульсов будут определяться следующими логическими соотношениями

$$U_{min} = 1/3 (v_2 - t_0) < (t_1 - t_0) < 2/3 (v_2 - t_0)$$

$$U_{max} = d_0 < (t_1 - t_0) < (t_2 - v_0).$$

Наибольшую сложность в вычислениях представляет длительности моделирующих импульсов, которые для наименьшей и наибольшей модели будут разными и зависеть как от величины отклонения среднего (промежуточного) обслуживания от центра альтернансного интервала триады, так и от расположения. При этом нужно учитывать максимальную длительность обслуживания триады

$$D_{max} = \max(v_0 - t_0, v_1 - t_1, v_2 - t_2),$$

которая может «перекрыть» слишком незначительное отклонение среднего обслуживания с метками t_1 и v_1 . Учитывая это обстоятельство, а также возможное левое или правое расположения среднего обслуживания относительно центра триады получим следующие выражения для длительностей импульсов наименьшей прилегающей модели

$$L_{min} = \begin{cases} D_{max}, (t_0 + v_2)/2 - t_1 < D_{max} \\ t_0 + v_2 - 2t_1, (t_0 + v_2)/2 - t_1 > D_{max} \\ 2v_1 - t_0 - v_2, v_1 - (t_0 + v_2)/2 > D_{max} \end{cases}$$

и соответственно наибольшей

$$L_{max} = \begin{cases} D_{max}, (v_0 + t_2)/2 - t_1 < D_{max} \\ v_0 + t_2 - 2t_1, (v_0 + t_2)/2 - t_1 > D_{max} \\ 2v_1 - v_0 - t_2, v_1 - (v_0 + t_2)/2 > D_{max} \end{cases}$$

Полученные величины длительностей прямоугольный импульсов модели используются при определении периодов следования исходя из следующих формул

$$T_{min} = (t_2 - t_0 - L_{min})/2$$

$$T_{max} = \max(v_1 - v_0 + L_{max}, t_2 - t_1).$$

Так же, как и для потока событий, при построении прилегающих моделей потока обслуживания полученные формулы для триады могут быть интерпретированы и на произвольное количество чередующихся обслуживаний внутри граничного интервала. Для этого среди них нужно будет найти обслуживание, определяющее наибольшую длину моделирующего импульса, центр которого и положение будут использоваться для учета отклонения соответствующего обслуживания аналогично среднему в триаде.

Следует отметить, что условия чередования обслуживаний с моделирующими импульсами в соответствии в правилами прилегающего моделирования могут выполняться и за пределами временного интервала, формируемого крайними *касающимися* фронтами обслуживаний и модельных импульсов. Поэтому следует различать понятия *опорного альтернансного интервала*, как расстояние между моментами прилегающих касаний крайних фронтов чередующихся импульсов, и *альтернансного квазирегулярного ряда*, общее понятие которого определено в [3], как непрерывающейся последовательности чередующихся импульсов. При этом, безусловно, для целей аналитики наиболее актуальными являются характеристики квазирегулярной последовательности, такие как ее длина или количество импульсов, а не собственно предельные границы касания импульсов. Опорный альтернансный интервал своими границами лишь позволяет найти требуемые параметры прилегающей импульсной последовательности – частоту, ширину и фазовое смещение. Отметим, что для наименьшей прилегающей модели импульсов (рис. 4), левая граница этого интервала всегда является передним касающимся фронтом, а правая граница определяется задним касающимся фронтом. Для наибольшей импульсной модели (рис. 5), наоборот, левым будут задний фронт левого опорного импульса, а правым – передний фронт правого.

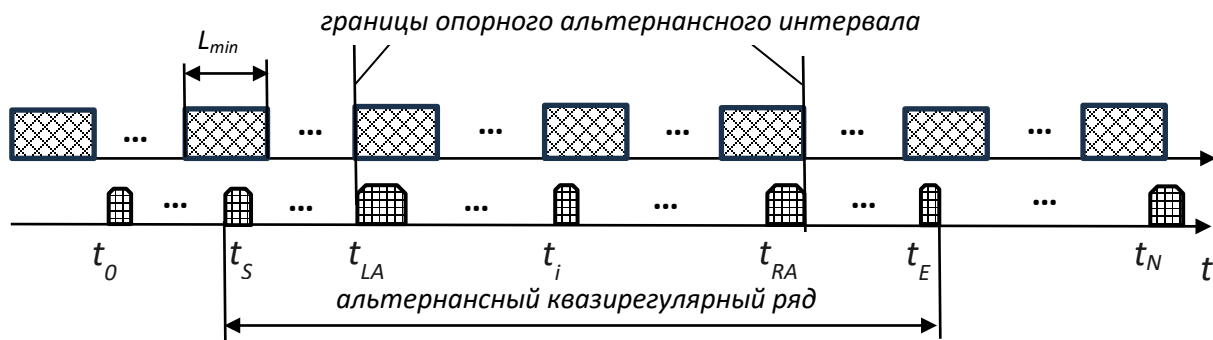


Рис. 4. Наименьшая широтная импульсная прилегающая модель нерегулярного потока обслуживания

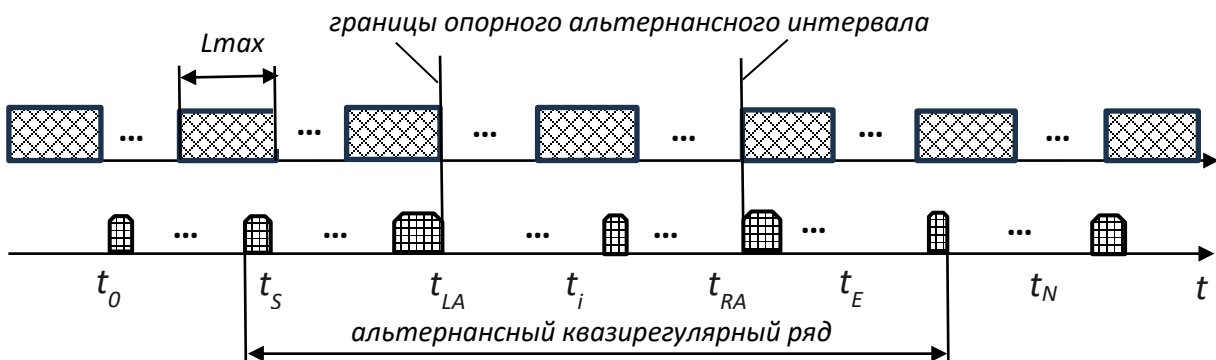


Рис. 5. Наибольшая широтная импульсная прилегающая модель нерегулярного потока обслуживания

Таким образом, задача формирования прилегающей модели заключается в том, чтобы для произвольного потока из $N + 1$ событий или обслуживаний с начальными метками от t_0 до t_N , найти альтернансный квазирегулярный ряд, например максимальной длины, от t_S до t_E , для чего требуется внутренний альтернансный интервал со своими границами от t_{LA} до t_{RA} . Такая схема нахождения прилегающих наименьшей (рис. 4) и наибольшей прилегающих моделей (рис. 5) может быть реализована алгоритмами комбинаторного поиска таких левой и правой границ опорного альтернансного интервала, для которых существовал бы соответствующий квазирегулярный ряд в соответствии с требованиями задачи, при этом, конечно, в общем длинном продолжительном потоке таких рядом может быть несколько.

В целом задачи исследования нерегулярности потоков событий или обслуживания могут быть достаточно разнообразными и включать в себя

- общую оценку их нерегулярности в виде количества и длин альтернансных квазирегулярных рядов, отношения частот наибольшей и наименьшей импульсной прилегающей модели, ширину импульса и другие характеристики;
- исследование тенденций и зависимостей в характере потоков, в том числе и их нерегулярности, таких как периодичность, оценка систематических составляющих, временные тренды по изменению основных параметров прилегающих моделей, формируемых для разных временных интервалов и прочие задачи.

Заключение

Представленная методология широтного прилегающего импульсного моделирования расширяет возможности концепции базового частотного моделирования учетом двух дополнительных факторов:

- 1) помимо потоков событий появилась возможность изучения и анализа нерегулярности потоков обслуживания, характеризующимися парными событиями начала и завершения процесса обслуживания;
- 2) введен вспомогательный параметр прилегающего импульсного сигнала – длительность импульса, что позволяет более наглядно и продуктивно проводить исследования нерегулярности потоков событий и обслуживания не только формированием общих для значительного временного интервала времени оценок, но и видеть внутренние особенности характера нерегулярности, которые определяются как случайными факторами, так и влиянием внешней среды.

Процесс построения прилегающих импульсных моделей может быть реализован путем достаточно сложной вычислительной обработки, путем комбинаторного поиска нужного по условию задачи альтернансного квазирегулярного ряда, например максимального. Комбинаторика этой задачи сводится к оптимизационному процессу поиска, каждый этап которого заключается в выделении двух событий или обслуживания, которые определяют границы левого и правого альтернанса и позволяют определить соответствующий данному альтернансному интервалу квазирегулярный ряд, а также вычислить необходимые параметры для анализа нерегулярности потока характеристики прилегающей импульсной модели, наибольшей или наименьшей. Алгоритм поиска наилучшего решения, в том числе и локального поиска или поиска с возвратом, выбирается разработчиками исходя из требований задачи анализа.

Прикладная область применения методологии импульсного прилегающего моделирования определяется любыми задачами управления деятельности предприятий и организаций самого разного назначения, которым технологически основываются на потоковом выполнении операционных процессов – обслуживаний, производственных технологических операций, платежей, передаче сообщений и пакетов по сетям коммуникации, доставки в системах логистики и многих других.

Перспективы развития представленной методологии импульсного моделирования состоят в

- формировании конкретных методик прикладных задач анализа потоков событий и обслуживания, связанных с учетом их нерегулярности, в том числе при нахождении тенденций, закономерностей и прогнозов, что даст возможность использовать эти методики в задачах управления;
- разработке эффективных алгоритмов нахождения альтернансных квазирегулярных рядов с нужными свойствами и характеристиками для создания высокопроизводительного программного обеспечения.

Список источников

1. Алгоритмы анализа структуры сигналов и данных : моногр. / А. С. Гуменюк, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко, В. Н. Цыганенко ; Ом. гос. техн. ун-т. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. 271 с. ISBN 978-5-8149-0931-2.
2. Чуканов С. Н., Цыганенко В. Н., Белик А. Г. Прикладное функциональное моделирование количественных величин в информационных и измерительных системах // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 1-3 (27). С. 402–408. EDN JWKMLF.
3. Белик А. Г., Цыганенко В. Н. Импульсные прилегающие элементы и их применение в анализе потоков событий // ИТ. Наука. Креатив : материалы I Междунар. форума (Омск, 14–16 мая 2024 г.). М. : ООО «Издат.-книготорговый центр «Колос-с»», 2024. С. 10–16. EDN DVRHEL.

УДК 65.011.56

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-24-28

Применение виртуальных анализаторов качества в первичной переработке нефти

The use of soft sensors in the primary oil refining

В. С. Виниченко¹, Е. И. Пастухова¹, И. А. Ибадуллаев², П. А. Батраков²

¹Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

²Нижегородский государственный университет, Нижегородск, Российская Федерация

V. S. Vinichenko¹, Y. I. Pastukhova¹, I. A. Ibadullaev², P. A. Batrakov²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

²Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russian Federation

Аннотация. В статье проведён анализ работы виртуального анализатора качества на нефтеперерабатывающем предприятии. На основе имеющихся данных технологического процесса (предикторов) был разработан виртуальный анализатор качества продукта первичной переработки нефти в виде регрессионной зависимости, а также при помощи нейронной сети прямого распространения. Приведено сравнение результатов работы полученных виртуальных анализаторов.

Ключевые слова: виртуальные анализаторы качества, система усовершенствованного управления технологическим процессом, метод множественной линейной регрессии, метод чёрный ящик, нейронная сеть прямого распространения, предиктивное управление

Abstract. The article analyzes the operation of a soft sensor at an oil refinery. Based on the available process data (predictors) A soft sensor of the product of primary oil refining was developed in the form of a regression relationship, as well as using a neural network of direct distribution. A comparison of the results of the obtained soft sensors is given.

Keywords: soft sensors, advanced process control (APC), multiple linear regression method, black box method, direct propagation neural network, predictive control

Введение

Одной из основных целей любого предприятия является повышение эффективности управления производством. Критериями эффективности можно назвать количество и качество выпускаемой продукции за определённое время и с минимальными затратами сырья и энергии. Нефтеперерабатывающая промышленность здесь стоит особняком так как масштабы производства очень велики, а потребность в конечной продукции является стратегической задачей государства. С развитием технологий ни одно предприятие не обходится без системы усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУТП). Задачами СУУТП являются постоянный контроль и управление технологическими параметрами процесса производства с возможностью прогнозировать качество и количество выпускаемой продукции при изменении входных данных [1].

В роли контролируемых переменных выступают показатели качества выпускаемой продукции. Качество продукции определяется с помощью лабораторного анализа. К сожалению, результаты анализов, получаемые средствами заводских лабораторий, как правило, не обладают необходимым уровнем полноты и оперативности. Практический опыт работы с результатами анализов показывает, что и их достоверность в некоторых случаях оказывается неудовлетворительной. Основная причина этого состоит в несоответствии пропускной способности и технологичности лабораторных средств анализа реальным потребностям современного производства [3].

Для получения оперативной информации о свойствах материальных потоков в настоящее время широко используются так называемые виртуальные анализаторы качества (ВАК), которые работают постоянно и предоставляют возможность получать необходимые данные в режиме реального времени. ВАК представляют собой математические модели, на основе которых производится расчёт показателя качества продукта с использованием доступных промышленных данных (данных со встроенных измерительных приборов).

Теория

Установка первичной переработки нефти включает в себя ректификационные колонны и обвязки: ребойлер, конденсатор, насосы, ёмкость, и т.д.

Ректификационные колонны – основное оборудование с принципом действия, основанным на испарении сырья. С помощью насоса сырая нефть поступает в теплообменное устройство, где нагревается, а затем направляется в трубчатую печь. Там уже происходит нагрев углеводородной смеси до определённой температуры. После этого она в парожидкостном состоянии поступает в испаритель ректификационной колонны, где и происходит процесс деления на пар и жидкость – испарения поднимаются вверх и удаляются, а сама жидкость стекает вниз.

Ректификационные колонны по давлению делятся на:

Атмосферные (АТ). В них получают бензин, керосин, дизельное топливо (ДТ) или мазут путём неглубокой переработки сырья.

Вакуумные (ВТ). В них получают газойль, масла, гудрон (необходимый для изготовления кокса, битума, смазочных веществ и т.д.).

Атмосферно-вакуумные (АВТ). Состоит из двух ректификационных колонн (атмосферной и вакуумной).

Постановка задачи

В процессе переработки нефтяного сырья на АВТ одним из контролируемых параметров ДТ является 95 % точка фракционного состава (ФС 95). Этот параметр может зависеть от множества переменных, таких как давление в колонне, расход, состав сырья, подача пара, температура на тарелке отбора и т.д.

Следует заметить, что главной проблемой ВАК является снижение их точности с течением времени. Простыми словами: невозможно построить универсальный ВАК на длительный период. Изменение факторов таких как качество сырья, параметры выпускаемой продукции, количество этой продукции и даже сезонное изменение климата серьёзно влияет на всю цепочку переработки нефтепродуктов. В этом случае ориентироваться необходимо на максимально свежих данных.

Существует множество способов построения ВАК. Отметим наиболее распространённые: множественная робастная регрессия (РР); метод ортогональных проекций на скрытые структуры на основе ядра (англ. Kernel-based Orthogonal Projections to Latent Structures, K-OPLS); метод чередующихся условных математических ожиданий (англ. Alternating conditional expectations, ACE); нейросети прямого распространения (НСПР) [2].

Метод множественной робастной регрессии (РР) основан на применении метода наименьших квадратов к цензурированной выборке. Для этого из статистической совокупности исключается некоторая доля объектов, имеющих слишком большие значения регрессионных остатков. Итерации продолжаются до тех пор, пока удаётся выделять объекты с большими значениями регрессионных остатков. Реализация данного метода широко используется в таких оболочках как Matlab и Microsoft Excel. Результатом данного метода является выражение, представленное в виде зависимости целевой функции от некоторых параметров. В нашем случае такую зависимость можно представить в виде выражения (1).

$$t_{\text{ФС95}} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_0, \quad (1)$$

где $t_{\text{ФС95}}$ – 95 % точка фракционного состава (ФС 95);

a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты регрессии;

x_1, x_2, x_3, x_4 – переменные;

a_0 – свободный член уравнения.

Результаты моделирования

Применяя метод РР на основе данных, был получен ВАК в виде регрессионной модели (табл. 1).

Анализ данного уравнения показал, что коэффициент корреляции ВАК составил 0,48. Для улучшения показателя необходим более углублённый анализ данных, их сортировка и корректировка.

Вместе с тем, авторы работы [2] показывают, что ВАК, построенный при помощи нейросети прямого распространения (НСПР), показывают лучший результат по сравнению с остальными (РР, K-OPLS, ACE).

Таблица 1

Значение коэффициентов регрессии ВАК

Обозначение	Значение коэффициентов регрессии
a_1	-0,176
a_2	0,185
a_3	-63,48
a_4	0,55
Свободный член уравнения (a_0)	274,05

На рис. 1 и 2 показана схема ВАК НСПР, составленная в среде моделирования Matlab [4].

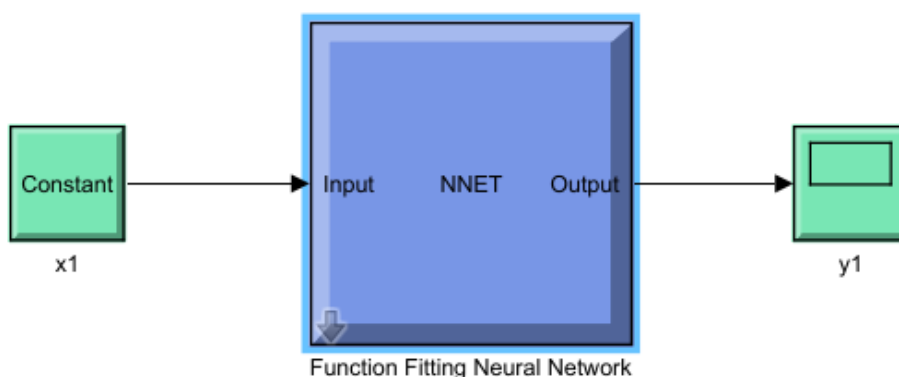


Рис. 1. Модель виртуального анализатора нейросети прямого распространения, выполненная в виде модели «чёрный ящик»

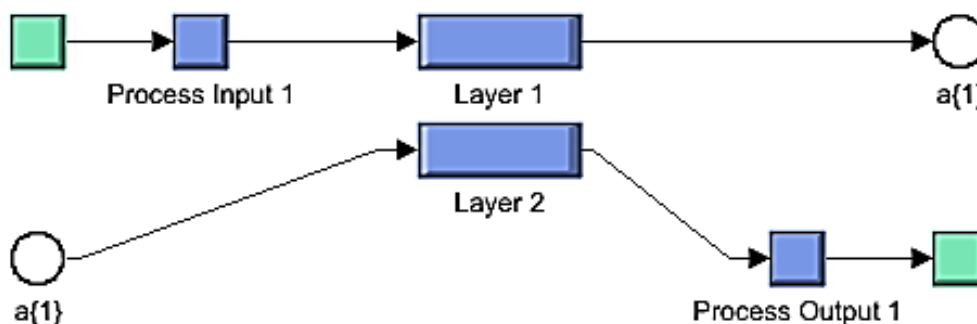


Рис. 2. Расчётный блок виртуального анализатора качества нейросети прямого распространения

ВА представляет собой так называемый «чёрный ящик». **Модель «чёрный ящик» (или black box)** позволяет описать процессы на основе экспериментальных данных. Система рассматривается как имеющая некий **«вход»** для ввода информации и **«выход»** для отображения результатов работы. При этом происходящие в ходе работы системы процессы наблюдателю неизвестны. Предполагается, что состояние выходов функционально зависит от состояния входов. В этой связи над данными процесса должна быть проведена достаточно качественная и кропотливая работа. Изучение системы по методу «чёрного ящика» сводится к наблюдениям за ней и проведению экспериментов по изменению входных данных. В ходе наблюдения над реакциями системы на внешние воздействия достигается определённый уровень знаний об исследуемом объекте, позволяющий осуществлять прогнозирование поведения «чёрного ящика» при любых заданных условиях [1].

Результат построения ВАК с помощью НСПР в среде Matlab представлен на рис. 3. Коэффициент корреляции данного ВАК выше, чем у ВАК, построенному при помощи множественной робастной регрессии на 18,5%.

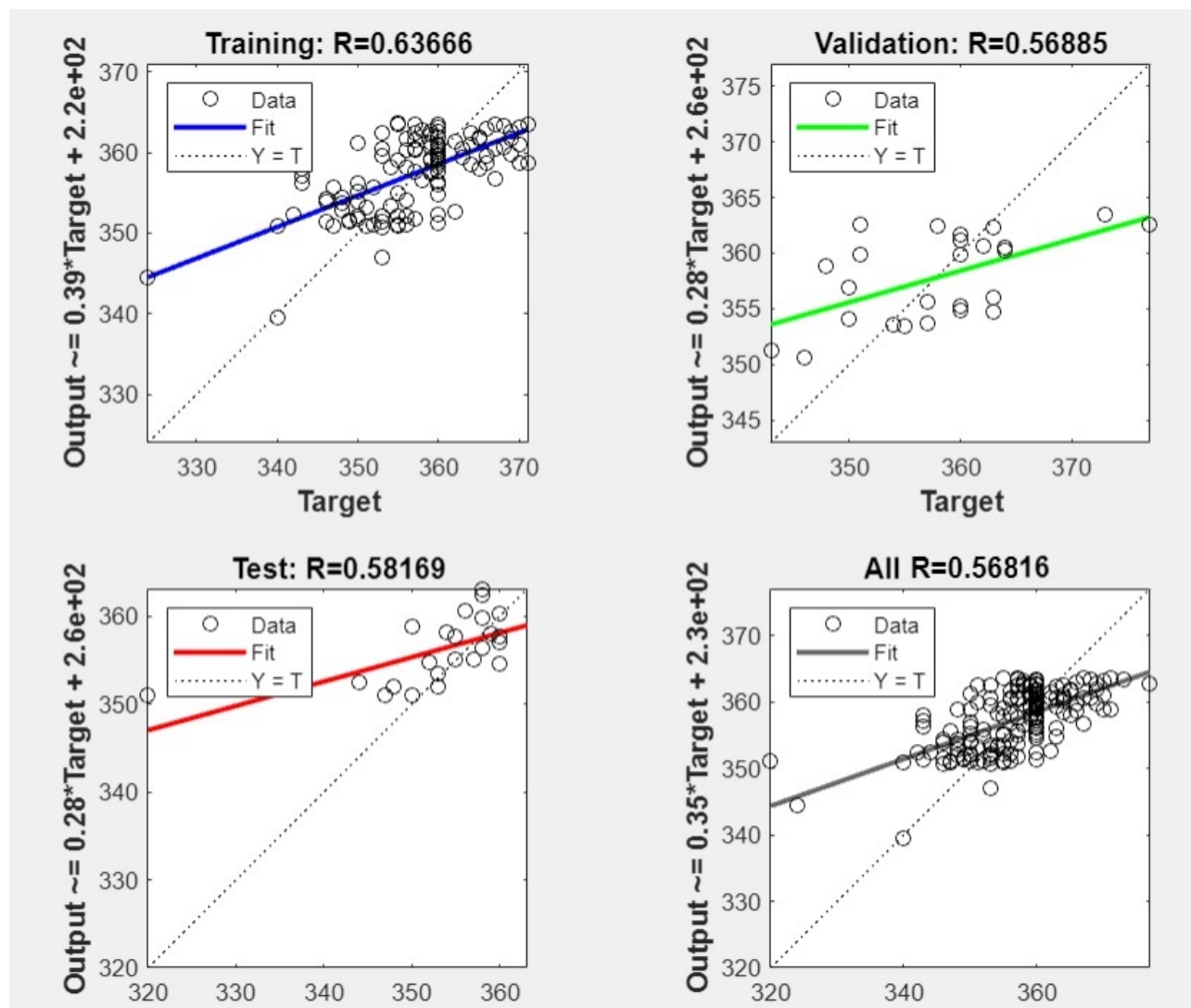


Рис. 3. Результат работы виртуального анализатора качества нейросети прямого распространения

Выводы и заключение

СУУТП позволяет значительно улучшить работу любого производства. ВАК являются неотъемлемой частью любой СУУТП и от того, как работает ВАК зависит эффективность работы всего предприятия. В этой связи метод построения ВАК играет ключевую роль. В данной работе было показано как может отличаться работа ВАК, построенного по одним и тем же данным разными методами.

Список источников

1. Снегирев О. Ю. Методы и алгоритмы построения адаптивных виртуальных анализаторов для систем усовершенствованного управления ректификационными колоннами : специальность 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» : дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2023. 138 с.
2. Разработка виртуальных анализаторов массообменного технологического процесса в условиях неполных данных и воздействия возмущений / А. А. Плотников, Д. В. Штакин, О. Ю. Снегирев, А. Ю. Торгашов // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 3. С. 22–25. EDN KМVІKО.
3. Торгашов А. Ю., Гончаров А. А., Самотылова С. А. Современные методы построения систем усовершенствованного управления технологическими процессами // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2016. № 4 (188). С. 102–107. EDN XHOEAL.

4. Фарунцев С. Д. Интеллектуальные технологии управления в технических системах : учеб. пособие / Ом. гос. техн. ун-т. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. 1 CD-ROM. Загл. с этикетки диска.
5. Ерофеев Д. В., Гоненко Т. В. Разработка виртуального анализатора для оценки плотности сырья // ИТ. Наука. креатив : материалы I Междунар. форума (Омск, 14–16 мая 2024 г.) : в 5 т. / Ом. гос. техн. ун-т. М. : Колос-с, 2024. Т. 1. С. 37–42. 1 on-line. EDN HUCPFS.
6. Шерстнев А. В., Гоненко Т. В. Разработка виртуального анализатора качества на базе ППО T-SOFT // ИТ. Наука. креатив : материалы I Междуна. форума (Омск, 14–16 мая 2024 г.) : в 5 т. Ом. гос. техн. ун-т. М. : Колос-с, 2024. Т. 1. С. 174–178. 1 on-line. EDN RVNOHT.
7. Система усовершенствованного управления установкой первичной переработки нефти: создание, внедрение, сопровождение / Д. Х. Файрузов, Ю. Н. Бельков, Д. В. Кнеллер, А. Ю. Торгашов // Автоматизация в промышленности. 2013. № 8. С. 3–10. EDN QUUHHJ.

Технологические и художественно-стилистические особенности галичского кружева

Technological, artistic and stylistic features of Galich lace

Е. Р. Гутарова

*Российский университет традиционных художественных промыслов,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

E. R. Gutarova

*Russian University of Traditional Applied Arts,
Saint Petersburg, Russian Federation*

Аннотация. Статья посвящена галичскому художественному кружевоплетению, которое является уникальным видом традиционных художественных промыслов. Рассматриваются исторические предпосылки возникновения кружевоплетения в Галиче, его расцвет и угасание, анализируются исторические образцы и научная литература. Отмечается, что галичское кружево отличается от других видов художественного кружевоплетения своими технологическими, колористическими и орнаментальными особенностями, их изучение будет способствовать его восстановлению и развитию. Технологические особенности выполнения изделий галичского художественного кружевоплетения схематично изображены на рисунках.

Ключевые слова: галичское художественное кружевоплетение, художественное кружевоплетение, традиционный художественный промысел, Галич, история кружевоплетения, технология художественного кружевоплетения

Abstract. The article is devoted to Galich artistic lacemaking, which is a unique type of traditional applied art. The historical prerequisites for the emergence of lacemaking in Galich, its flourishing and extinction are considered, historical samples and scientific literature are analyzed. It is noted that Galich lace differs from other types of artistic lacemaking by its technological, coloristic and ornamental features, their study will contribute to its restoration and development. Technological peculiarities of Galich artistic lacemaking are schematically depicted in the images.

Keywords: Galich artistic lacemaking, artistic lacemaking, traditional applied art, Galich, history of lacemaking, technology of artistic lacemaking

Введение

Галичское кружево является малоизученным видом традиционных художественных промыслов России. Оно отличается от других видов художественного кружевоплетения своими технологическими, колористическими, орнаментальными особенностями. Наличие научных работ, обзорающих историю галичского кружева, а также описывающих его характерные особенности, будет способствовать распространению информации о галичском художественном кружевоплетении и являться методическим источником для заинтересованных лиц.

Многослойное кружевоплетение является малораспространённым в России, а галичское кружево – малоизвестным. В настоящее время не существует учебных пособий, в которых описана технология плетения галичского многослойного кружева. Базой для исследования данной темы явились образцы галичского кружева отдела народного искусства Государственного Русского музея в Санкт-Петербурге.

В ходе исследования были рассмотрены научные работы искусствоведов, изучающих художественное кружевоплетение, таких как В.А. Фалеева, М.А. Сорокина, Н.Т. Климова, а также таких авторов, как Т.А. Криницына, И.В. Гурьянова. Ни в одной из работ перечисленных авторов не была рассмотрена технология выполнения галичского кружева.

Целью данной статьи является выявление художественно-стилистических и технологических особенностей галичского кружева, посредством анализа исторических образцов и научной литературы.

Галичское кружево – утраченный вид традиционных художественных промыслов. Актуальность исследования заключается в сохранении и развитии галичского художественного кружевоплетения. В процессе обучения на кафедре художественного кружевоплетения в Российском университете традиционных художественных промыслов студентами под руководством преподавателей кафедры ведутся исследования утраченных исторических видов художественного кружевоплетения, в том числе галичского.

Выявление технологических и художественно-стилистических особенностей галичского художественного кружевоплетения, а также их систематизация, могут сыграть ключевую роль в восстановлении этого уникального художественного промысла.

Историческая характеристика развития галичского кружевоплетения

В XVI веке через город Галич шла вся костромская торговля с Москвой и Вятским краем [7, с. 142], что и является предпосылкой для появления народного художественного промысла в этой местности. Нет точных сведений о возникновении кружевоплетения в Костромской губернии, однако к концу XVIII века в Галиче уже сформировался уникальный вид художественного кружевоплетения с характерной технологией плетения [7, с. 142]. Кружево также изготавливалось крепостными мастерицами для дворянских домов. Дочери и жены купцов занимались кружевоплетением как домашним рукоделием. О том, были ли в городе профессиональные кружевницы, работающие на заказ, информации нет [7, с. 142].

Почти все выплетаемое галичское кружево служило декоративным оформлением для парадных полотенец [7, с. 142]. Материалы использовались дорогие – шёлковые, золотые, серебряные нити [1, с. 177].

Расцвет галичского кружевоплетения пришёлся на вторую половину XVIII – первую четверть XIX века [7, с. 147], в связи с новыми бытовыми условиями дворянской среды, а как следствие, с модой на иностранные кружева как в одежде, так и в интерьере усадеб [7, с. 29].

Существенную часть капитала галичские купцы получали от торговли с Архангельском, где были установлены торговые связи с Голландией и Англией. В связи с перемещением центра внешней торговли из Архангельска в Санкт-Петербург в середине XVIII века [2], Галич перестал быть крупным центром торговли, из-за чего спрос на кружево к началу XIX века значительно снизился [7, с. 147].

Кружево, выплетаемое из дорогих нитей, к тому же кропотливое, не могло найти продолжения в работах сельских кружевниц. В XIX веке в деревне недалеко от Галича выплетали льняные изделия, не имеющие художественной ценности [7, с. 147].

В фонде Костромского музея-заповедника имеются образцы галичского кружева начала XX века, сплетённые из хлопчатобумажных или льняных нитей [1, с. 177]. В это время были попытки возрождения данного вида традиционного художественного промысла костромским земством. Однако, выплеталось кружево сепное, и такого мастерства, как у кружевниц XVIII–XIX веков, достичь не удалось. В изделиях не прослеживается опоры на исторические образцы галичского многопарного кружева.

Художественно-стилистические особенности галичского художественного кружевоплетения.

Ассортимент изделий галичского художественного кружевоплетения не широк, представляет собой мерное кружево, которое использовалось для декоративного оформления широких назеркальных полотенец, праздничных рушников и подзоров.

Галичское художественное кружевоплетение выполняется в трудоёмкой многопарной технике плетения, которая даёт возможность наиболее реалистично изобразить любой мотив [8, с. 5], поэтому для галичского кружева характерно широкое их разнообразие: птицы, сказочные существа, верблюды, олени, крылатые львы, кони, растения различные по конфигурации, картуши, медальоны, гирлянды, геометрические узоры [8, с. 5] (рис. 1, 2).



Рис. 1. Конец назеркального полотенца. Деталь.
Кон. XVIII – нач. XIX вв. Костромская губерния, Галич



Рис. 2. Конец назеркального полотенца.
Конец XVIII в. Костромская губерния, Галич

Изделие имеет сетчатый фон из квадратных ячеек, окружающий основной узор из плотной полотнянки, иногда разреженной круглыми или четырёхгранными просветами [4, с. 45]. Полотнянка часто обрамляется цветным контуром сканой нити [4, с. 45] (рис. 3).



Рис. 3. Конец назеркального полотенца.
Кон. XVIII в. Костромская губерния, Галич

Как пишет Н.Т. Климова в своей работе, орнамент в галичском кружеве XVIII–XIX веков развивался в трёх направлениях [4, с. 45].

- Орнамент с опорой на народную вышивку и ткачество. Композиция в данном случае построена на равномерном чередовании одной, двух или трёх фигур или может представлять собой строго симметричную композицию с цветущим деревом, расположенном в центре и двумя фигурами, помещёнными по сторонам. Слева и справа от дерева могут быть расположены птицы-сирины, птицы-павы, олени, грифоны, двуглавые орлы [4, с. 45] (рис. 4).

- Орнамент с опорой на европейские растительные мотивы [4, с. 45]. Однако, галичские кружевницы не внесли существенного вклада в колорит или орнамент данного вида [4, с. 45]. Кружево с таким орнаментом выплеталось по европейским образцам [3, с. 19].

- Орнамент, близкий классицизму или рококо, стилям, господствующим в XVIII–XIX веках. Композиция охарактеризована как орнаментальный ряд с повтором симметричных фигур [4, с. 46]. Данный вид орнамента содержал растительные мотивы, картуши, розетки, медальоны, изящные ветви, с небольшими цветами и листьями. Данный вид орнамента также отличается своеобразным колоритом и фактурой. Колорит в данном типе кружева сложный; светлый фон и орнамент, выполненный в сближенных тонах: тёплый золотистый, охристый, розовый перемежаются с зелёным, изумрудным [4, с. 46] (рис. 5).



Рис. 4. Образец галичского кружевоплетения.
XVIII в. (?). Костромская губерния, Галич



Рис. 5. Конец назеркального полотенца.
XVIII в. Костромская губерния, Галич

Галичское кружево богато различными цветовыми сочетаниями. Чаще всего наблюдаются такие цвета, как кораллово-красный, кремовый, коричневый, кирпичный, желтовато-охристый, различные оттенки зеленого, тёмно-синий, травянисто-зелёный, светло-голубой. [4, с. 47]. Встречаются образцы одноцветные: белый или кремовый. Можно выделить такую характерную черту галичского кружева как многоцветность (рис. 6).



Рис. 6. Образец галичского кружева.
XVIII в.

В книге «Русское плетёное кружево» В.А. Фалеевой присутствуют рисунки-схемы, которые чётко отображают характерную форму выплетаемых мотивов [7, с. 66], а также была выполнена обрисовка растительных и зооморфных орнаментов галичского кружева для большей наглядности (рис. 7, 8).



Рис. 7. Изображение путти и верблюда с кружева полотенца конца XVIII в, Галич, Костромская губ.

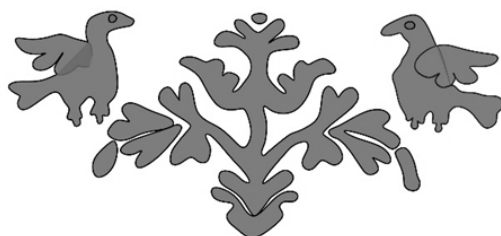


Рис. 8. Рисунок-схема зооморфных и растительных мотивов, выполненная по образцу конца XVIII в.
Составитель схемы: Е. Р. Гутарова

Технология галичского художественного кружевоплетения

Основной узор и фоновая решётка в многопарном кружевоплетении выполняются одновременно. Пары нитей, участвующие в плетении решётки, вплетаются в основной узор и выполняют функцию долевых пар, а также уходят из основного узора в решётку.

Основной узор выполняется «полотнянкой без перевива пар» [6, с. 24] (рис. 9).

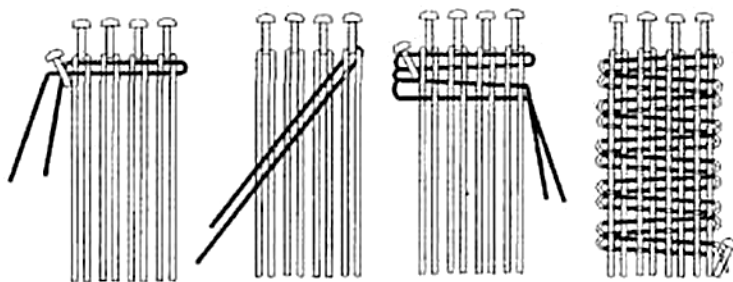


Рис. 9. Схема плетения полотнянки без перевива пар. Полотнянка без перевива пар.

URL: <https://rukodelkino.com/pletenie-krujev/818-polotnjanka-bez-pereviva-par.html>

(дата обращения: 04.02.2025)

В зависимости от ширины выполняемого элемента выбирается количество пар нитей. Нити добавляются в полотнянку навешиванием на булавки по краю плетения. Если элемент сужается, откидывать следует нити из середины полотнянки. На схеме показано, каким образом пары из решётки вплетаются в элемент, и выходят из него. Зелёными точками помечены места в элементе, где требуется добавить дополнительные долевые пары; красными точками – где пары рекомендуется убрать из плетения (рис. 10).

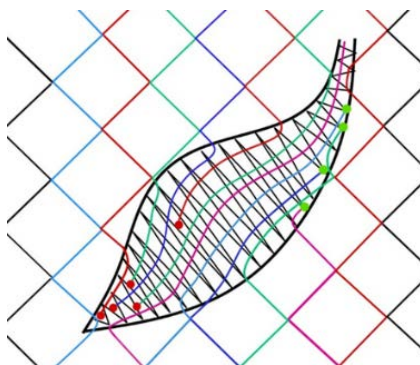


Рис. 10. Схема выполнения плетения кружевного элемента с фоновой решеткой.
Составитель схемы: Е. Р. Гутарова

Элементы основного узора могут раздваиваться. В зависимости от расположения раздвоения и его конфигурации узор может выполняться двумя способами.

Первый способ. Не доходя до места раздвоения, добавляются дополнительные долевые пары, которые сначала объединяются общей ходовой, а далее одна из долевых пар становится второй ходовой, и уходит в плетение ответвленного элемента вместе с долевыми парами нитей (рис. 11).

Второй способ. На месте раздвоения в основной элемент вплетаются пары нитей из выполненного ответвленного элемента. Узор проплетается до прочного закрепления всех долевых пар нитей в плетении. Если ходовая нить ответвленного элемента такого же цвета и толщины, как и долевые, она вплетается в основной элемент; становится долевым. Если она отличается от долевых, следует выполнить зашивку ходовой в конце плетения (рис. 12).

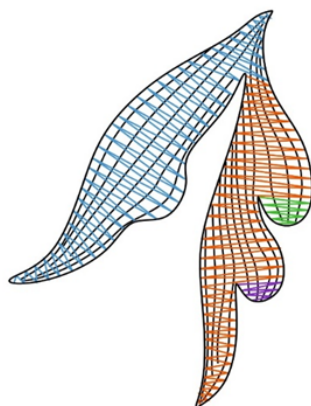


Рис. 11. Схема навешивания ходовой в элементе с первым вариантом раздвоения.
Составитель схемы: Е.Р. Гутарова

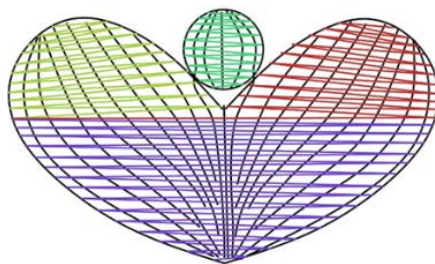


Рис. 12. Схема соединения ходовых в элементе с вторым вариантом раздвоения.
Составитель схемы: Е. Р. Гутарова

Основная фоновая решетка в галичском кружеве – простая решетка в пол заплёта с дополнительным перевивом между сплетениями. Она выполняется следующим образом:

- навесить на крайние булавки по две пары коклюшек, сплести их в полный заплёт;
- навесить на вторую и третью булавки по две пары коклюшек и сплести их в полный заплёт;
- взять в правую руку крайнюю левую пару со второй булавки, в левую руку взять крайнюю правую пару с первой булавки, перевить их два раза и сплести в пол заплёта;
- поставить булавку в точку между парами, повторить операцию перевить и сплести
- отложить крайнюю правую пару, переложить левую пару в правую руку;
- взять в левую руку крайнюю правую пару нитей с первой булавки;
- перевить пары нитей дважды, сплести их в полный заплёт;
- отложить крайнюю правую пару нитей, левую пару взять в правую руку, перевить её один раз;
- взять в левую руку пару с первой булавки, перевить её 3–4 раза;
- сплести пары левой и правой руки в полный заплёт;
- отложить первую крайнюю левую пару, взять вторую крайнюю долевую в правую руку, поставить булавку между двумя крайними долевыми парами;
- перевить пары один раз и сплести их в полный заплёт [6, с. 15].

Плетение последующих рядов аналогично первому.

Галичское художественное кружевоплетение славится своим разнообразием решёток, создающих неповторимую фактуру кружева. Только в исторических образцах галичского кружева встречается решётка, выполняемая пересекающимися полотнянками. Технология плетения решётки из полотнянок выполняется следующим образом:

- в начале плетения ставится точка заплёта. На булавку, помещенную в эту точку, навешивается две пары коклюшек: одна из них – ходовая, другая – долевая. Выполняется полный заплёт;
- на каждой из сторон должно стоять по две точки. Выполняется полотнянка без перевива пар;
- ходовая сплетается с долевой;
- аналогичным образом выполняется полотнянка с противоположной стороны;
- ходовые пары встречаются в точке пересечения линий на сколке. Выполняются действия «сплести, перевить, сплести»;
- между парами ставится булавка для поддержания формы, далее они будут закреплены в таком положении;
- ходовые сплетаются с соответствующими долевыми нитями. Выполняются действия «сплести, перевить, сплести», булавки ставятся на пересечениях линий, между ходовыми и долевыми, ходовая нить огибает булавку;
- долевыми нити сплетаются. Выполняются действия «сплести, перевить, сплести»;
- долевыми нити сплетаются с соответствующими ходовыми нитями действиями «сплести, перевить, сплести», после этого долевыми откладываются в сторону;
- ходовые нити сплетаются. Выполняются действия «сплести, перевить, сплести». Булавка ставится между ходовыми парами над сплетением на пересечении линий, прорисованных на сколке. Таким образом, сохраняется форма «квадрата»;
- каждой из образовавшихся пар выполняется полотнянка без перевива пар.

Каждый из последующих рядов выполняется аналогично. На схеме показаны направления ходовых пар в решётке из полотнянок. Голубые точки обозначают места расстановки булавок (рис. 13).

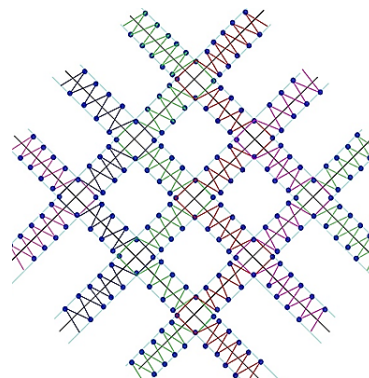


Рис. 13. Схема плетения решётки из полотнянок, выполняемых из двух пар.
Составитель схемы: Е. Р. Гутарова

Также одной из наиболее часто встречающихся решёток в галичском художественном кружевоплетении является разновидность московской решётки, распространенной в многопарном кружеве. Отличительной особенностью галичской фоновой решетки от московской решётки является наличие дополнительного перевива между сплетениями.

Если нить ходовой основного узора отличается по толщине или цвету от нити, используемой в плетении фона, предлагается увести её крючком по краю узора, а далее зашивается иглой по направлению соответствующих ходовых нитей. В исторических образцах галичского кружева ходовая нить по окончании плетения обрезалась.

Количество пар коклюшек, использованных при плетении исторических образцов доходило до 900, при этом средняя ширина готового изделия – всего 50–70 см [5, с. 45]. В основном, в перечне изделий мерное кружево – прошвы и края (свесы и края).

Дальнейшие исследования технологии галичского кружева и пошаговое выполнение элементов, используемых в галичском кружевоплетении, будут подробно отражены в последующих статьях.

Выводы и заключение

В ходе исследования были выявлены следующие художественно-стилистические особенности галичского художественного кружевоплетения:

- широкое разнообразие мотивов, используемых в орнаменте;
- изделие имеет тонкий ажурный сетчатый фон из квадратных ячеек, выносящий плотный основной узор на передний план;
- полотнянка обрамляется толстой цветной шёлковой сканью;
- галичское кружево многоцветное;
- ассортимент изделий представляет собой мерное кружево, используемое для декоративного оформления назеркальных полотенец, рушников и подзоров.

Согласно Н.Т. Климовой, орнамент в галичском кружеве XVIII-XIX веков развивался в трёх направлениях:

- орнамент с опорой на народную вышивку и ткачество;
- орнамент с опорой на европейские растительные мотивы;
- орнамент, близкий классицизму или рококо;

Среди технологических особенностей галичского художественного кружевоплетения можно выделить следующие:

- техника плетения – многопарная: основной узор и фоновая решётка выполняются одновременно;
- основной узор выполняется полотнянкой без перевива пар;
- элементы основного узора обрамляются толстой цветной сканью;
- многообразие решёток: чаще всего можно наблюдать простую решётку в пол заплёта с дополнительным перевивом между сплетениями, московскую решётку, решётку, выполняемую полотнянками из двух пар;
- в основном узоре возможен плавный поворот ходовой;
- долевы пары добавляются в полотнянку навешиванием на булавки по краю плетения, убираются пары из середины полотнянки, если они плотно укреплены в плетении;
- в элементах могут присутствовать раздвоения, круглые или ромбовидные просветы;
- Если цвет, материал и толщина ходовой нити в элементе основного узора идентичен нити в фоновой решётке, ходовая по окончании плетения вплетается в решётку. Если нити отличаются, ходовая иглой уводится в полотнянку.

Галичское кружево – уникальный, но малоизученный вид русского кружевоплетения. Оно отличается сложной многопарной техникой и характерным орнаментом. Расцвет галичского кружева пришелся на XVIII–XIX века, но затем оно пришло в упадок из-за изменения экономических условий. В начале XX века предпринимались попытки возрождения промысла, но они не увенчались успехом. Исследование галичского кружева важно для его сохранения и восстановления, так как оно является частью культурного наследия России.

В данной статье отражены результаты исследования исторических образцов галичского кружева и литературных источников, описывающих исторические факты возникновения, развития и угасания данного вида художественного промысла.

Благодарности

Научный руководитель: Лапшина Е.А., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет традиционных художественных промыслов», кандидат педагогических наук, заведующий кафедрой художественного кружевоплетения.

Список источников

1. Фалеева В. А. Русское плетеное кружево. Ленинград : Художник РСФСР, 1983. 326 с.
2. Веретенникова И. Л. Обзор фонда «Ткани. Кожа» // 100 лет Императорскому Романовскому музею : альбом-каталог / под ред. И. С. Наградова, Н. В. Павличковой. Кострома : Арт-студия «Дягиль», 2014. С. 173–180.
3. Подробная история города Галича Костромской области. Основные этапы развития города. URL: <https://костромские-деревни.рф/история-галича/> (дата обращения: 04.02.2025).
4. Юмагулова В. М., Калачева Е. В., Шафиков Т. Т. Региональные особенности русского плетеного кружева // Костюмология. 2020. Т. 5, № 2. URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/10IVKL220.pdf> (дата обращения: 04.02.2025).
5. Климова Н. Т. Народный орнамент в композиции художественных изделий. Цветное коклюшечное кружево. Москва : Изобразительное искусство, 1993. 210 с.
6. Гурьянова И. В. Особенности плетеного кружева Костромского края // Культура и искусство в современном образовательном пространстве : материалы всерос. науч.-практич. конф. Кострома : Костромской государственный университет, 2017. С. 16–21.
7. Лапшина Е. А. Технология художественного кружевоплетения : учебник / под науч. ред. В. Ф. Максимович. 2-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург, 2021. 110 с.
8. Криницына Т. А. Галичское кружево XVIII–XIX столетия // Костромская слобода. 2017. № 1 (12). С. 45–52.

Оценка эффективности метрик валидации в задачах классификации текстов

The effectiveness of validation metrics in text classification tasks

А. В. Коротких

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

A. V. Korotkikh

Omsk state technical university, Omsk, Russian Federation

Аннотация. При решении задач классификации текстов исследователям необходимо оценивать эффективность работы алгоритмов на проверочных данных. В данной работе особое внимание уделено метрикам оценки при классификации текстов. В работе приведены наиболее часто используемые метрики, проведён сравнительный анализ метрик, даны рекомендации по их выбору. Представлены значения различных метрик при решении задачи оценки трудоёмкости задач разработки программного обеспечения, как задачи классификации текстов, а так же задачи классификации новостей. В качестве метрики позволяющей оценивать качество классификации на проверочной выборке предложено использование коэффициента корреляции Мэтьюса. Сделаны выводы о необходимости применения данной метрики взамен значения функции потерь на проверочной выборке.

Ключевые слова: дисбаланс классов, матрица ошибок, коэффициент Мэтьюса, методы оценки трудоёмкости, машинное обучение, искусственный интеллект, классификация текстов на естественном языке, метрики валидации

Abstract. When solving text classification problems, researchers need to evaluate the effectiveness of algorithms based on validation data. In this paper, special attention is paid to validation methods for text classification. The paper presents the most frequently used metrics, provides a comparative analysis of metrics, and provides recommendations on their selection. The values of various metrics are presented when solving the software effort estimation problem as text classification task, as well as news classification tasks. The use of the Matthews correlation coefficient is proposed as a metric for evaluating the quality of classification in a test dataset. Conclusions are drawn about the need to use this metric instead of the value of the loss function in the validation dataset.

Keywords: class imbalance, confusion matrix, Matthews correlation coefficient (MCC), effort estimation methods, machine learning, artificial intelligence, natural language text classification, validation metrics

Введение

Существует большое количество задач, решаемых с помощью алгоритмов классификации текстов: категоризация новостей, определение цели пользовательского запроса в чате, анализ эмоций и тональности, классификация жанров и стилей, медицинская диагностика по текстовым описаниям, юридическая категоризация, категоризация научных статей и пр. Всё чаще для решения этих задач применяются нейронные сети глубокого обучения.

Обучение параметров моделей производится методом стохастического градиентного спуска. Кроме того требуется настройка так называемых гиперпараметров модели. Для оценки качества работы модели после настройки гиперпараметров обучающая выборка делится на части, одна из них используется для обучения, а другая для проверки качества работы модели и настройки гиперпараметров. Для сравнения качества классификации могут использоваться следующие метрики: среднее арифметическое значение функции потерь на проверочной выборке, F1-мера, коэффициент корреляции Мэтьюса, доля верных ответов. В данной работе показано, что использование для подбора гиперпараметров метрик, отличных от среднего арифметического значения функции потерь, повышает качество классификации для задач с дисбалансом классов и большим уровнем шума, таких как, определение трудоёмкости задач разработки программного обеспечения по текстовым описаниям этих задач. Целью данной работы является систематизация метрик валидации для классификации текстов, анализ их применимости в зависимости от характеристик исходных данных.

Теория

В процессе обучения глубоких нейронных сетей отслеживают значения функции потерь. При этом, если на обучающей выборке функция потерь убывает, то для проверочной выборки убывание функции на определённых этапах сменяется ростом. В этом случае говорят о так называемом «переобучении». Если за критерий

остановки обучения взять минимальное среднее значение функции потерь на проверочной выборке, то на этом этапе обучение останавливают и производят оценку качества работы модели с выбранными значениями гиперпараметров.

В работе [1] дано следующее определение матрицы ошибок: пусть дано множество образцов $S = \{s_i; 1 \leq i \leq C\}$, множество классов $N = \{1, \dots, n\}$ и две функции $t(s_i)$ и $p(s_i)$, такие что $t(s_i)$ равно истинному классу, а $p(s_i)$ равно предсказанному моделью классу. Тогда можно задать матрицу ошибок $C \in M(|N| \times |N|)$, $C_{ij} = |\{s \in S: t(s)=i \text{ и } p(s)=j\}|$. Полученная матрица ошибок наиболее полно характеризует качество работы обучаемой модели, но её невозможно использовать для автоматического подбора гиперпараметров, возникают сложности анализа и при ручном подборе с большим количеством вариантов. Поэтому используются показатели каким либо образом характеризующие матрицу ошибок.

Наиболее простой мерой оценки результатов классификации (1) является отношение числа правильно классифицированных образцов m к общему их числу n , через значения элементов матрицы ошибок выражаемое следующим образом:

$$A = \frac{m}{n}, \text{ где } m = \sum_{k=1}^N C_{kk}, \quad n = \sum_{i,j=1}^N C_{ij} \quad (1)$$

Но данная метрика очень плохо отражает качество предсказаний модели в случае несбалансированных классов. Если количество элементов одного из классов преобладает над количеством элементов других классов, то модель, присваивающая всё время метку этого класса, будет получать высокие значения данной метрики. При этом такая модель очевидно практически не применима.

Так же легко интерпретируемой метрикой является F1-мера, данная метрика является средним гармоническим значением показателей точности и полноты вычисляется следующим образом:

$$F1 = 2 \frac{P \cdot R}{P + R}, \text{ где } P \text{ и } R: \quad (2)$$

$$P_k = \frac{C_{kk}}{\sum_{j=1, j \neq k}^N C_{kj}}, \quad P = \frac{\sum_{k=1}^N P_k}{N}.$$

$$R_k = \frac{C_{kk}}{\sum_{i=1, i \neq k}^N C_{ik}}, \quad R = \frac{\sum_{k=1}^N R_k}{N}.$$

Коэффициент корреляции Мэттьюса первоначально был предложен для бинарной классификации, в дальнейшем в работах [2] и [1] был обобщён для многоклассовой классификации:

$$MCC = \frac{\sum_{k,l,m=1}^N C_{kk} C_{ml} - C_{lk} C_{km}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \left[\left(\sum_{l=1}^N C_{lk} \right) \left(\sum_{f,g=1, f \neq k}^N C_{gf} \right) \right]} \sqrt{\sum_{k=1}^N \left[\left(\sum_{l=1}^N C_{kl} \right) \left(\sum_{f,g=1, f \neq k}^N C_{fg} \right) \right]}} \quad (3)$$

Коэффициент корреляции Мэттьюса лежит в диапазоне $[-1; 1]$, 0 – при случайном угадывании, 1 – когда все предсказанные значения совпадают с истинными, и около -1, когда нет ни одного верно предсказанного значения. В работе [1] показано, что коэффициент корреляции Мэттьюса устойчив при изменении числа классов, может использоваться как для бинарной, так и для многоклассовой классификации, а так же для несбалансированных наборов данных.

Результаты

Для анализа применимости метрик валидации были выбраны два набора данных: новости ВВС и трудоёмкости задач разработки программного обеспечения. Первый набор был взят, как хорошо классифицируемый моделями глубокого обучения набор, на втором наборе показатели точности классификации ниже. Количество классифицируемых текстов для набора «Новости ВВС» по категориям представлено на рис. 1. На рис. 2 представлено количество текстов для набора «Трудоёмкость задач».

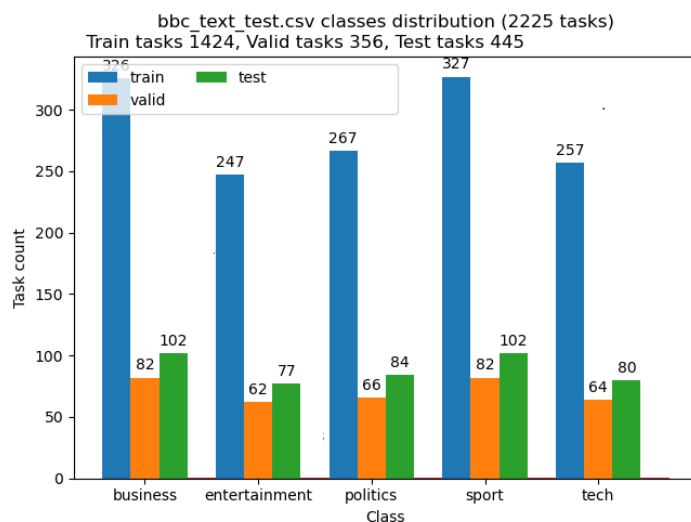


Рис. 1. Количество текстов по категориям
в наборе данных "Новости BBC"

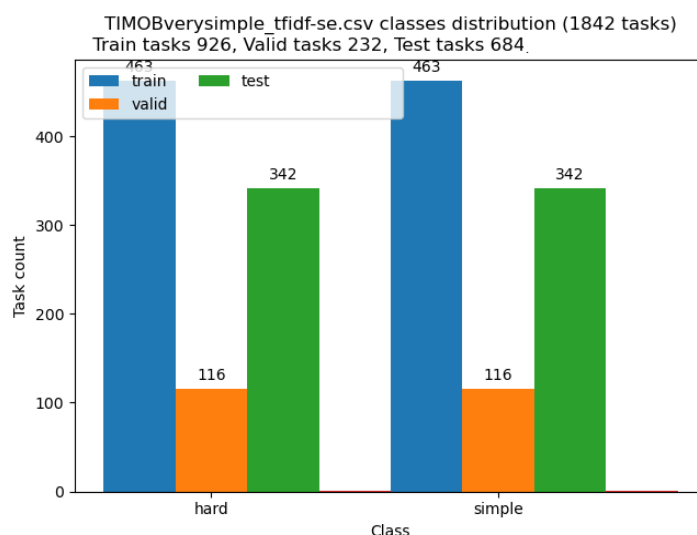


Рис. 2. Количество текстов по категориям
в наборе данных "Трудоёмкость задач"

Результаты экспериментов были получены с использованием следующих моделей классификации текстов:

1. на основе архитектуры GPT2 [3] к исходной модели добавлен классифицирующий линейный слой;
2. на основе архитектуры GPT2 [3] с добавлением промежуточного слоя с 768 входами, 768 выходами и функцией активации GELU[4], а затем классифицирующий линейный слой.

В таблице 1 приведены значения метрик валидации, полученные на различных этапах обучения, а так же значения метрик на контрольной выборке рассчитанные после тестирования соответствующих моделей. В первой строке для каждой модели представлены показатели для наименьшего значения функции потерь на проверочной выборке, в следующей строке – для наибольшего значения MCC (см. формулу 3) на проверочной выборке и в последней строке значения для последней эпохи обучения. Результаты эксперимента показывают, что в 2х случаях из 4х наилучшие значения показателей точности на контрольной метрике были получены при выборе модели по лучшим значениям MCC полученным на проверочной выборке. И во всех случаях модель с наименьшим значением функции потерь на проверочной выборке показывала худшие результаты на контрольной выборке.

Значение метрик валидации

Набор данных	Модель	Значение функции потерь на проверочной выборке (№ эпохи)	MCC		F1		A	
			Проверочная	Контрольная	Проверочная	Контрольная	Проверочная	Контрольная
«Трудоёмкость задач»	1	0,59 (3)	0,3104	0,2546	0,6551	0,6270	0,6552	0,6272
		0,92 (5)	0,4579	0,3498	0,6782	0,6442	0,6983	0,6594
		0,68 (6)	0,3365	0,2606	0,6679	0,6299	0,6681	0,6301
		2,35(15)	0,2760	0,2401	0,6378	0,6196	0,6379	0,6199
	2	0,58 (3)	0,4363	0,3326	0,6920	0,6432	0,7026	0,6550
		0,66 (4)	0,4579	0,3546	0,6782	0,6451	0,6983	0,6608
		1,89 (14)	0,3980	0,2459	0,6977	0,6189	0,6983	0,6213
		1,92 (15)	0,3443	0,2226	0,6642	0,6028	0,6681	0,6082
«Новости ВВС»	1	0,20 (5)	0,9719	0,9720	0,9763	0,9774	0,9775	0,9775
		0,34 (10)	0,9649	0,9832	0,9715	0,9862	0,9719	0,9865
	2	0,14 (2)	0,9684	0,9747	0,9742	0,9796	0,9747	0,9798
		0,17 (3)	0,9789	0,9747	0,9834	0,9796	0,9831	0,9798
		0,35 (10)	0,9647	0,9775	0,9714	0,9823	0,9719	0,9820

Выводы и заключение

Результаты эксперимента показали, что подход с остановкой обучения при минимальном значении функции потерь на проверочной выборке даёт не самые лучшие значения метрик MCC, F1 и A для проверочной и контрольной выборок. В двух случаях из четырёх лучшие показатели на контрольной выборке были получены при выборе модели по лучшему значению MCC на проверочной выборке, ещё в двух случаях лучшей оказалась модель обученная на большем количестве эпох обучения. Таким образом, можно сделать предположение, что необходимо продолжать обучение при наличии возможности и в дальнейшем из обученных моделей выбирать лучшую по значению MCC. Вывод о применимости данного правила делать рано, необходимо провести исследования на большем количестве наборов данных и алгоритмов классификации.

Список источников

1. Jurman G., Riccadonna S., Furlanello C. A Comparison of MCC and CEN Error Measures in Multi-Class Prediction // PLoS ONE. 2012. Vol. 7, no. 8. P. e41882. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0041882> (date accessed: 03.05.2025).
2. Gorodkin J. Comparing two K -category assignments by a K -category correlation coefficient // Computational Biology and Chemistry. 2004. Vol. 28, no. 5. P. 367–374.
3. Language Models are Unsupervised Multitask Learners / A. Radford, J. Wu, R. Child [et al.]. URL: https://cdn.openai.com/better-language-models/language_models_are_unsupervised_multitask_learners.pdf (date accessed: 03.05.2025).
4. Hendrycks D., Gimpel K. Gaussian Error Linear Units (GELUs). 2023. URL: <http://arxiv.org/abs/1606.08415> (date accessed: 28.04.2025).

УДК 004.9

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-42-47

Создание LSTM модели для прогнозирования аномалии

Creation of LSTM model for anomaly prediction

Н. О. Костюченко, В. Б. Косогова, С. Р. Бектимиров

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

N. O. Kostyuchenko, V. B. Kosogova, S. R. Bektimirov

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Одним из перспективных направлений в промышленности стала предиктивная аналитика. Она помогает выявлять потенциальные неисправности оборудования и его компонентов, прогнозируя возможные поломки задолго до их возникновения. Раннее обнаружение аномалий позволяет избежать серьезных последствий, а обслуживание агрегатов с выявленными отклонениями обходится значительно дешевле, чем их ремонт или полная замена. Такой подход позволяет оптимизировать бизнес-процессы, повышать эффективность работы предприятий и минимизировать возможные риски. Сейчас же многие компании создают и внедряют системы описательной и предиктивной аналитики. Эти системы анализируют накопленные данные и прогнозируют будущие события, применяя методы математической статистики, моделирования и машинного обучения.

Ключевые слова: предиктивная аналитика, алгоритм, определение отклонений, аномалия, оборудование, предсказание

Abstract. Predictive analytics has become one of the most promising trends in the industry. It helps identify potential malfunctions of equipment and its components, predicting possible breakdowns long before they occur. Early detection of anomalies allows avoiding serious consequences, and maintenance of units with detected abnormalities is much cheaper than their repair or complete replacement. This approach allows optimizing business processes, increasing the efficiency of enterprises and minimizing possible risks. Now many companies create and implement systems of descriptive and predictive analytics. These systems analyze accumulated data and predict future events by applying methods of mathematical statistics, modeling and machine learning.

Keywords: predictive analytics, algorithm, outlier detection, anomaly, hardware, prediction

Введение

В современном мире обработка временных рядов играет ключевую роль в анализе данных, особенно при обнаружении аномалий в сложных системах. Одним из эффективных инструментов для решения этой задачи являются рекуррентные нейронные сети (RNN), а в частности – сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM).

Целью данной статьи является создание модели машинного обучения для прогнозирования аномалии на основе LSTM алгоритма.

Для реализации данной темы необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) сбор и обработка данных;
- 2) реализация модели автоэнкодера;
- 3) линейный прогноз;
- 4) построение модели LSTM.

Теория

1. Описание автоэнкодера

Многослойные сети-автоэнкодеры – глубокие нейронные сети специальной архитектуры. Многослойный автоэнкодер представляет собой специальный вид многослойной сети прямого распространения – многослойный симметричный персептрон, содержащий несколько внутренних слоев уменьшающегося размера и слой «бутылочная горловина» в середине сети. Этот слой разделяет автоэнкодер на два сегмента: энкодер и декодер [3].

После прохождения через энкодер в узком слое формируется вектор, компоненты которого представляют собой «признаки» – обобщённые характеристики объекта (или код). Эти признаки извлекаются из исходных данных и содержат важную, но избыточную информацию, позволяющую описать объект в пространстве меньшей размерности, называемом скрытым (latent) пространством. Такой процесс достигается за счёт устранения избыточности, а также выявления скрытых взаимосвязей и корреляций в исходных данных.

Декодер выполняет обратное преобразование, восстанавливая данные из скрытого представления, полученного от энкодера. Он также состоит из нескольких слоёв нейронов, но их количество увеличивается на каждом этапе. Декодер обучается реконструировать входные данные, завершая процесс автоэнкодирования, при котором выходные данные стремятся максимально точно соответствовать исходным.

Во время обучения автоэнкодер получает только нормальные данные технологических процессов и минимизирует ошибку реконструкции, то есть разницу между исходными и восстановленными данными. После завершения обучения ему предоставляется новый набор данных, в котором могут присутствовать аномалии.

2. Описание LSTM

Долгая краткосрочная память (*Long short-term memory; LSTM*) – особая разновидность архитектуры рекуррентных нейронных сетей, способная к обучению долговременным зависимостям. Они были представлены Зеппом Хохрайтер и Юргеном Шмидхубером в 1997 году, а затем усовершенствованы и популярно изложены в работах многих других исследователей. Они прекрасно решают целый ряд разнообразных задач и в настоящее время широко используются [1].

LSTM-алгоритмы специально созданы для решения проблемы долговременной зависимости. Они изначально способны запоминать информацию в течение длительного времени, а не вынуждены этому обучаться с трудом.

Нейросети LSTM используют в целях классификации, обработки и построения прогнозов на основе временных рядов, где взаимосвязанные явления имеют возможность происходить с неопределенной временной периодичностью.

LSTM имеет структуру, подобную цепочке, но внутренний модуль имеет другую структуру. Внутри вместо одного слоя их четыре, взаимодействующих друг с другом.

Любая рекуррентная нейронная сеть представляет собой последовательность повторяющихся модулей. В стандартной RNN каждый такой модуль имеет довольно простую структуру, например, это может быть один слой с активационной функцией $\tanh$ (гиперболический тангенс). Архитектура LSTM представлена на рис. 1.

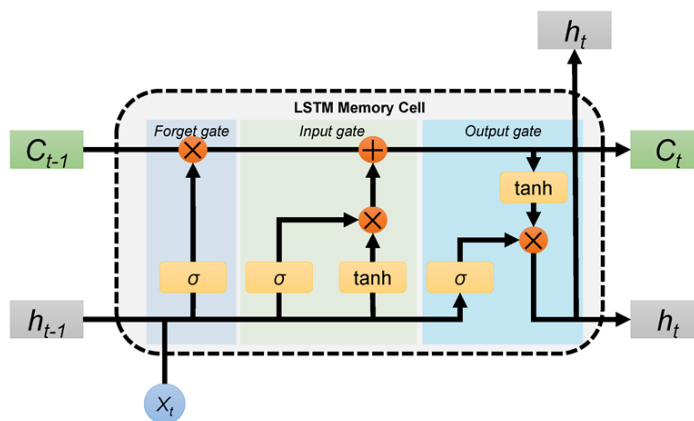


Рис. 1. Архитектура LSTM

Принцип работы рекуррентных нейронных сетей заключается в добавлении механизма памяти к искусственным нейронным сетям. Главная особенность LSTM-моделей связана с алгоритмом, позволяющим определять память как «короткую», что дает возможность на каждом этапе обучения обновлять хранимую информацию либо сразу, либо спустя несколько итераций. Это позволяет LSTM эффективно решать проблему долговременной зависимости, запоминая данные как на краткие, так и на длительные временные интервалы, что особенно важно при прогнозировании макроэкономических показателей. Такой эффект достигается благодаря отсутствию функции активации внутри рекуррентных компонентов, что предотвращает размывание значений во времени и устраняет проблему исчезающего градиента при обучении методом обратного распространения ошибки.

Основными элементами LSTM являются ячейки памяти и три вида фильтров: забывания, входной и выходной. Ячейка выполняет функцию хранения информации и передает её по всей цепочке модулей, что позволяет использовать даже ранние временные данные на поздних этапах, устраняя проблему кратковременной памяти.

Помимо прогнозирования, LSTM-модель также применяет графические и статистические методы для предварительного анализа временных рядов и интерпретации результатов. Полученные данные сравниваются с выводами других исследований и экспертными оценками для более точного анализа.

Результаты

1. Обработка данных

Для построения модели автоэнкодера необходим набор данных с оборудования. В качестве выборки будут три датчика температуры компрессора, для которых будет и проводиться анализ. Данные были загружены в Excel-файл за 4 месяца. После чего необходимо обработать выборку, т.к. у каждого собранного значения датчика своя временная метка. В общем итоге получаются данные по трем датчикам, у которых получились разные длины и разное время сбора. Необходимо обработать данные, тем самым привести все данные к общей временной метки, а также убрать пропуски.

Для ускорения сходимости модели важно предварительно масштабировать данные, так как большие значения во входных параметрах могут замедлять процесс обучения. Для нормализации использовался `StandardScaler` из библиотеки `sklearn` [2].

`Sklearn` настраивался исключительно на обучающей выборке, после чего применялся для преобразования тестовых данных, которые ранее не использовались в процессе обучения. Если бы нормализация выполнялась на всем наборе данных сразу, это могло бы улучшить результаты модели на имеющихся данных, но снизить её способность к обобщению, что негативно сказалось бы на работе с новыми реальными данными.

После масштабирования необходимо преобразовать данные в формат для моделирования LSTM с помощью библиотеки `MinMaxScaler`:

```
scaler = MinMaxScaler() #StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit(X_train).transform(X_train)
X_train_scaled = pd.DataFrame(X_train_scaled, columns = X_train.columns, index = X_train.index)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)
X_test_scaled = pd.DataFrame(X_test_scaled, columns = X_test.columns, index = X_test.index)
```

2. Обучение модели автоэнкодера

Перед обучением модели необходимо инициализировать модель, выставить базовые настройки: количество эпох, слоёв, параметры сети и размер пакета.

Пример инициализации:

```
model=Sequential()
model.add(Dense(10,activation=act_func,
kernel_initializer='glorot_uniform',
kernel_regularizer=regularizers.l2(0.0),
input_shape=(X_train_scaled.shape[1])))
model.compile(loss='mae',optimizer='adam') # функция потерь, оптимизатор
# количество эпох, размер пакета
NUM_EPOCHS=20
BATCH_SIZE=10
```

После чего обучаем модель и производим распределение функции потерь в обучающем наборе. Строим график распределения вычисленных потерь в обучающем наборе (рис. 2).

Его можно использовать для определения подходящего порогового значения для выявления аномалии. При этом можно убедиться, что этот порог установлен выше «уровня шума», и что любые отмеченные аномалии должны быть статистически значимыми выше шумового фона.

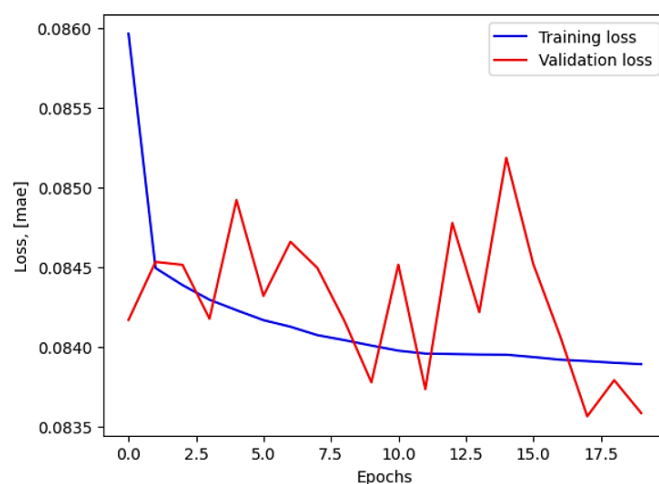


Рис. 2. График распределения вычисленных потерь

На графике представлены две линии: «Training loss» – ошибка на выборке для обучения и «Validation loss» – ошибка на выборке для тестирования.

Определим порог для определения аномалии, где выставляем самое большое число ошибки (квантиль): $\text{threshold} = \text{scored}['\text{Loss_mae}']. \text{quantile}(q=0.999)$.

Исходя из приведенного выше распределения потерь и порога рассчитаем потери на тестовом наборе. Вклад параметра в аномалию (доля ошибки и прирост доли) или по-другому – насколько сильно каждая точка влияет на то, была ли аномалия или нет (в процентах). Это и будет результат модели автоэнкодера (рис. 3).



Рис. 3. Результат работы автоэнкодера

Подводя итог, можно сказать, что с помощью модели автоэнкодера можно определить аномалии по собранным данным с оборудования, то есть, как сильно/не сильно значение с датчика влияет на возникновение аномалии. На рис. 3 произведена визуализация полученной средней абсолютной ошибки (Loss_mae) и сглаженной ошибки (Loss_mae_EWMA), а также граница (если ошибка выше, чем порог – это аномалия). На графике ниже представлены значения влияния значений датчиков на аномалию.

3. Линейный прогноз

Линейный прогноз – это метод предсказания будущих значений временного ряда на основе линейной зависимости между прошлыми и будущими данными. Он основан на модели линейной регрессии, где будущие значения представляются как линейная комбинация предыдущих наблюдений. Такой подход эффективен при наличии устойчивых трендов, но плохо учитывает сложные нелинейные зависимости.

Линейный прогноз в LSTM используется для сравнения качества предсказаний, выявления трендов и создания гибридных моделей, комбинирующих линейные и нелинейные зависимости.

Линейная регрессия описывается уравнением:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_nx_n + \varepsilon,$$

где:

- y – предсказанное значение,
- $x_1, x_2, \dots, x_n$ – независимые переменные,
- b_0 – свободный член,
- $b_1, b_2, \dots, b_n$ – коэффициенты (веса), определяющие влияние факторов,
- ε – ошибка (шум).

Линейная регрессия применяется для прогнозирования и анализа влияния факторов на результат, а также как базовый алгоритм машинного обучения.

Воспользуемся библиотекой `sklearn` – `LinearRegression`. Результат моделирования представлен на рис. 4. Сверху представлена граница, слева – данные для обучения (реальные), справа – представление линейной регрессии, то есть предсказание, как дальше пойдет линия с точками.

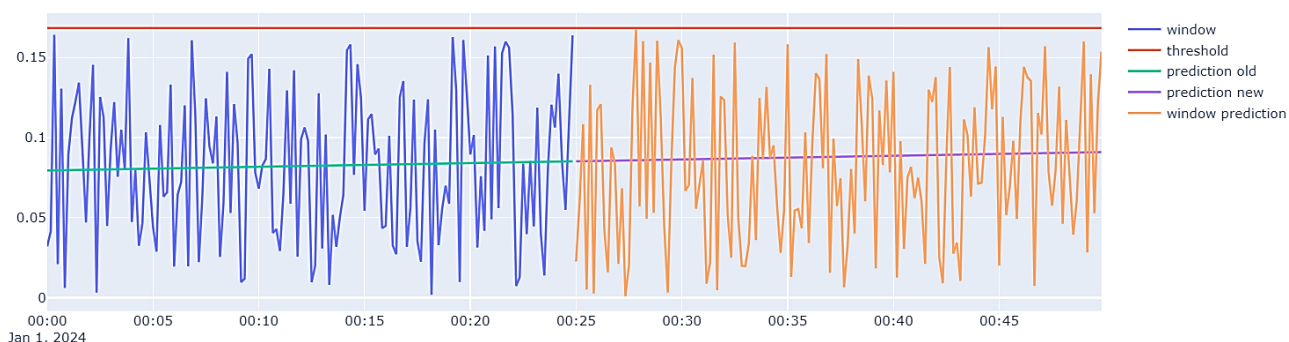


Рис. 4. Результат линейной регрессии

4. Модель LSTM

Для обучения модели данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки, для обучения использовались 80%, для тестирования – 20%. После чего преобразуем длинную последовательность данных во множество более коротких последовательностей (по 60 тактов на последовательность), которые сдвинуты на один такт.

Далее была построена модель машинного обучения LSTM (рис. 5), состоящая из 4 слоев:

```
model = Sequential()
model.add(layers.LSTM(100, return_sequences=True, input_shape=(X.shape[1], 1)))
model.add(layers.LSTM(50, return_sequences=False))
model.add(layers.Dense(25))
model.add(layers.Dense(1))
model.summary()
```

Layer (type)	Output shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 60, 100)	40,800
lstm_1 (LSTM)	(None, 50)	30,200
dense_4 (Dense)	(None, 25)	1,275
dense_5 (Dense)	(None, 1)	26

Рис. 5. Модель LSTM

Затем данные для тестирования были также приведены к виду последовательностей. Полученные предсказания на данных для тестирования и фактические значения представлены на рис. 6. Ошибка предсказания RMSE составила 0.0015, что является отличным результатом. Исходя из произведённого опыта, можно подтвердить, что LSTM предсказывает поведения автоэнкодера и учится на полученных аномалиях, чтобы их предсказывать.

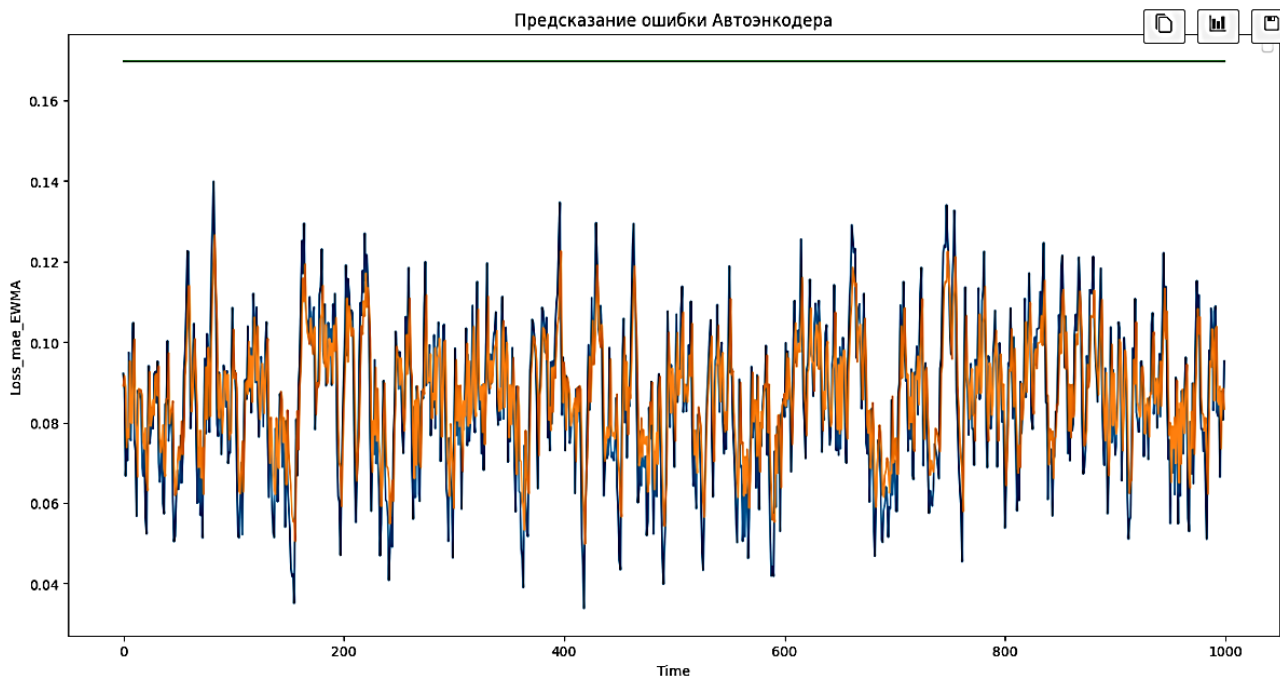


Рис. 6. Предсказание ошибки автоэнкодера

Выводы и заключение

Для построения модели автоэнкодера были использованы данные с датчиков температуры компрессора, с предварительной обработкой данных (масштабирование, синхронизация временных меток). Модель автоэнкодера успешно обучалась, минимизируя ошибку реконструкции, и позволяла определить порог для аномалий. Результаты демонстрируют, как данные датчиков могут влиять на обнаружение аномалий.

В модели LSTM использовалась линейная регрессия для сравнения предсказаний и выявления трендов, после чего был построен более сложный подход на основе LSTM. Она была обучена на 80% данных, а тестирование показало хорошую точность с ошибкой предсказания $RMSE = 0.0015$, что подтверждает эффективность использования LSTM для предсказания на основе временных рядов.

Список источников

1. Долгая краткосрочная память. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Долгая_краткосрочная_память (дата обращения: 12.01.2025).
2. Scikit-learn. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Scikit-learn> (date accessed: 11.02.2025).
3. Кузьмина М. Г. Многослойные сети-автоэнкодеры в задачах анализа и обработки гиперспектральных изображений. URL: https://keldysh.ru/papers/2021/prep2021_28.pdf (дата обращения: 12.02.2025).
4. Смирнов А. В., Тищенко И. П. Применение нейронных сетей сиамской архитектуры в задачах классификации продуктов различных категорий на прилавках универсама // Программные системы: теория и приложения. 2024. Т. 15, № 2 (61). С. 113–137.

УДК 61

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-48-55

**Разработка системы анализа питания и классификации заболеваний
для Омского государственного медицинского университета**

**Development of a nutrition analysis and disease classification system
for Omsk State Medical University**

А. Ю. Лавров, Д. В. Турчанинов

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

A. Y. Lavrov, D. V. Turchaninov

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. В статье рассматривается влияние пищевых привычек на развитие различных заболеваний, а также анализируются основные закономерности, связывающие рацион питания с рисками возникновения патологий. Кроме того, в работе представлена разработка системы анализа питания, предназначенной для классификации заболеваний и выявления потенциальных факторов риска. Для выявления скрытых закономерностей и предсказания возможных заболеваний используются алгоритмы машинного обучения, включая нейронные сети. Разработанная система ориентирована на поддержку медицинских работников в диагностике и профилактике заболеваний, связанных с питанием.

Ключевые слова: анализ питания, влияние питания на заболевания, классификация заболеваний, медицинские информационные системы, машинное обучение, нейронные сети

Abstract. The article examines the influence of eating habits on the development of various diseases, as well as analyzes the main patterns linking the diet with the risks of pathologies. In addition, the paper presents the development of a nutrition analysis system designed to classify diseases and identify potential risk factors. Machine learning algorithms, including neural networks, are used to identify hidden patterns and predict possible diseases. The developed system is focused on supporting medical professionals in the diagnosis and prevention of nutrition-related diseases.

Keywords: nutrition analysis, the effect of nutrition on diseases, classification of diseases, medical information systems, machine learning, neural networks

Введение

Питание – это основа жизнедеятельности человека, один из важнейших факторов, способствующих снижению риска развития алиментарно-зависимых заболеваний (АЗЗ), обеспечивающих активное долголетие и участвующих в формировании адаптационного потенциала организма [1]. Однако нарушения питания, включая как недостаточность питательных веществ, так и избыточное потребление, представляют собой значимую проблему для современной клинической медицины. Исследования показывают, что более половины пациентов, госпитализированных в хирургические и терапевтические стационары, имеют выраженные нутритивные нарушения, обусловленные недостаточным питанием или хроническими заболеваниями желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) [2]. Алиментарные заболевания, вызванные дефицитом или избытком питательных веществ, включают широкий спектр патологий, таких как квашиоркор (недостаточность белка), маразм, ожирение, метаболический синдром и сахарный диабет 2-го типа [3].

Современные медицинские исследования все чаще используют технологии искусственного интеллекта для анализа сложных взаимосвязей между питанием и здоровьем. Машинное обучение и нейронные сети позволяют не только выявлять скрытые закономерности в больших массивах данных, но и формировать персонализированные рекомендации по питанию, направленные на профилактику и коррекцию заболеваний. Внедрение таких технологий в медицинские учреждения может существенно повысить эффективность диагностики и мониторинга состояния пациентов.

Задачей исследования является разработка методического подхода к анализу пищевых привычек и классификации заболеваний на основе алгоритмов машинного обучения.

Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования системы нутритивного мониторинга в Омском государственном медицинском университете, а также для повышения качества профилактики и диагностики алиментарно-зависимых заболеваний.

Теория

Основные функции питания. Основные функции питания можно разделить на три ключевые категории:

1) питание является основным источником энергии для организма. Энергия необходима для поддержания всех жизненных процессов (физическая активность, метаболизм, терморегуляция). Белки, жиры и углеводы (БЖУ) выступают основными источниками энергии для организма, причем углеводы обеспечивают наиболее быстрый доступ к энергии;

2) питание обеспечивает организм пластическими веществами, такими как белки, жиры и минералы. Эти вещества необходимы как для роста, так и для восстановления и замены клеток. Особенно важна эта функция в детском возрасте, когда организмы активно развиваются и требуют большого количества «строительных материалов» для формирования новых тканей;

3) питательные вещества играют критическую роль в регуляции обмена веществ. Витамины и минералы, поступающие с пищей, необходимы для синтеза ферментов и гормонов, которые регулируют химические процессы в организме. Без биологически активных веществ нормальное функционирование организма невозможно. Например, в случае недостатка железа у детей в раннем возрасте, может развиваться анемия, а недостаточное количество йода у детей в период интенсивного развития ЦНС может привести к потере существенной доли интеллектуальных способностей.

Влияние питания на развитие и профилактику заболеваний. Питание оказывает большое влияние на развитие и профилактику заболеваний, что подтверждается множеством научных исследований. Правильный рацион не только помогает поддерживать нормальное функционирование организма, но и служит важным фактором предотвращения различных заболеваний.

Правильное питание является ключевым аспектом в профилактике хронических неинфекционных заболеваний, таких как сердечно-сосудистые заболевания, диабет 2 типа, проблемы ЖКТ. Ожирение, например, является основным фактором риска для этих заболеваний и его можно предотвратить с помощью сбалансированного рациона, в состав которого будут входить фрукты, овощи и цельнозерновые продукты.

Ключевую роль также играют и микронутриенты. Витамины и минералы играют важную роль в укреплении иммунной системы и защите организма от инфекций. Питание, содержащее антиоксиданты и клетчатку, способствует снижению воспалительных процессов и улучшению общего состояния здоровья. Недостаток клетчатки может привести к развитию диабета, ожирения, а также злокачественных новообразований, поэтому рекомендуется употреблять не менее 400 г овощей и фруктов в день для снижения риска данных заболеваний [1].

Понятие алиментарно-зависимых заболеваний. Алиментарно-зависимые заболевания – болезни, обусловленные недостаточным или избыточным по сравнению с физиологическими потребностями поступлением в организм пищевых веществ.

В основе современных представлений о здоровом питании лежит **концепция оптимального питания**, предусматривающая необходимость и обязательность полного обеспечения потребностей организма не только в эссенциальных макро- и микронутриентах, но и в целом ряде минорных биологически активных компонентах пищи, перечень и значение которых постоянно расширяется.

Концепция оптимального питания базируется на **двух фундаментальных законах**, первым из которых является соответствие энерготрат энергопотреблению, что предопределяет важное значение энергетического баланса организма, **вторым** – обязательность потребления основных пищевых веществ (белков, жиров и углеводов) в физиологически необходимых соотношениях, что позволяет удовлетворить потребности человека в отдельных эссенциальных (незаменимых) нутриентах.

Нарушение любого из этих законов (недостаточное или избыточное потребление пищи или отдельных нутриентов) неизбежно приводит к нарушениям пищевого статуса и, как следствие, – к АЗЗ.

К алиментарно-зависимым заболеваниям относятся:

- 1) болезни белковой и калорийной недостаточности (квашиоркор, маразм);
- 2) заболевания, связанные с недостаточностью минеральных веществ (например, дефицит йода, кальций) и витаминов (цинга, рахит, пеллагра);
- 3) ожирение;
- 4) анемия, вызванная дефицитом железа, фолиевой кислоты, витаминов В12 и В6.

Белки, жиры и углеводы: их роль и потребность. Белки, жиры и углеводы – три основных макронутриента, из которых организм получает энергию для жизнедеятельности. Они необходимы для поддержания энергетического баланса, а также для усвоения витаминов и минералов.

Белки – вещества-строители, выполняющие более 6 важных функций для организма. Позволяют вырабатывать ферменты, участвуют в процессах транспорта и обмена веществ, являются материалом для строительства клеток, а также отвечают за энергетический баланс [4].

Жиры – вещества, составляющие основу питания всего живого. Они необходимы как для поддержания энергетического баланса, так и для усвоения некоторых групп витаминов и минеральных веществ. Многие привыкли ассоциировать жиры с неполезными составляющими питания, пытаются всячески уменьшить их процент в рационе или попросту отказаться от них. Жиры необходимы организму. Они являются элементом строительства тканей, транспортерами питательных веществ и энергетическими запасами и подразделяются они на две большие группы:

1) животные жиры – вещества, получаемые от продуктов животного мира. Они содержат в себе высокий процент холестерина и достаточно медленно усваиваются;

2) растительные жиры – вещества, источником которых служат исключительно растения. Это большинство видов, масел злаковых и семян, авокадо и оливки. Такие жиры усваиваются легче, чем животные, однако не способны в полной мере их заменить.

Углеводы – органические вещества, выполняющие строительную, энергетическую и защитную функцию для организма. Содержатся во всех фруктах и овощах, а также в крупах и их производных. Углеводы разделяются на сложные и простые. Первые относятся к категории полезных, дающих организму энергию на длительное время и рекомендуемых к регулярному потреблению. Простые, напротив, легко усваиваются и вызывают резкий подъем глюкозы в организме. Это приводит к избытку сахара, получению чрезмерной энергии и образованию излишков жиров, приводящих к избыточному весу.

Важно соблюдать баланс БЖУ, чтобы обеспечить организм необходимыми питательными веществами и энергией для поддержания здоровья.

Влияние физической активности на потребности в макронутриентах. Физическая активность оказывает сильное влияние на потребности организма в макронутриентах и общую калорийность питания. Сбалансированное питание с соответствующим соотношением белков, углеводов и жиров имеет решающее значение, но его необходимо корректировать в зависимости от личных целей, характера деятельности и интенсивности тренировок. В таблице ниже представлены нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для взрослых [1].

Таблица 1

Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах

Показатели (мужчины)	Группа физической активности										
	1-я (КФА 1,4)			2-я (КФА 1,7)			3-я (КФА 2,0)			КФА 1,7	
Возраст, г	18–29	30–44	45–64	18–29	30–44	45–64	18–29	30–44	45–64	65–74	> 75
Энергия, ккал	2370	2280	2100	2880	2760	2550	3390	3250	2990	2330	2259
Белок, г	71	68	63	86,4	82,9	76,4	101,6	97,5	89,8	82	79
в том числе животный	35,5	34	31,5	43,2	41,5	38,2	50,8	48,8	44,9	41	39,5
% от ккал	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14
Жиры, г	79,1	75,8	69,9	96	92,1	84,8	112,9	108,3	99,8	78	75
Жир, % от ккал	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Углеводы, г	344	330	304	418	400	369	491	471	434	326	316
% от ккал	58	58	58	58	58	58	58	58	58	56	56
Женщины											
Энергия, ккал	1980	1800	1660	2690	2580	2370	2690	2580	2370	1802	1666
Белок, г	57	54	50	81	77	63	81	77	71	63	58
в том числе животный	28,5	27	25	40,5	38,5	35,5	40,5	38,5	35,5	31,5	29
% от ккал	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14
Жиры, г	63	60	55	76	73	67	90	86	79	56	56
Жир, % от ккал	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Углеводы, г	274	261	240	332	318	290	390	374	343	252	233
% от ккал	58	58	58	58	58	56	58	58	58	56	56

Витамины и минералы: их роль в метаболизме. Витамины и минералы играют ключевую роль в метаболизме, обеспечивая нормальное функционирование биохимических процессов в организме. Они участвуют в преобразовании питательных веществ в энергию, синтезе белков, регуляции обмена веществ и поддержании гомеостаза.

Выделяют следующие витамины:

1) витамины группы В (такие как В1, В2, В3, В5, В6, В7, В9 и В12) активно участвуют в энергетическом обмене, а дефицит витаминов данной группы может привести к различным заболеваниям. Большинство витаминов данной группы являются водорастворимыми [5];

2) витамин D участвует в регуляции кальция и фосфора, что важно для минерализации костей;

3) витамин С обладает антиоксидантными свойствами и участвует в синтезе коллагена, что важно для здоровья кожи и соединительных тканей;

4) жирорастворимые витамины А, D, Е и К – вместе этот витаминный квартет помогает поддерживать в хорошем состоянии глаза, кожу, легкие, а нервную систему. На формирование костей большое влияние оказывают витамины А, D и К. Кроме того витамин А поддерживает здоровье клеток и защищает зрение, а без витамина Е организму было бы трудно усваивать и накапливать витамин А.

К основным относят такие минералы, как кальций, хлорид, магний, фосфор, калий, натрий, сера. Одна из ключевых их задач заключается в поддержке водного баланса в организме. Главную роль в этом играют натрий, хлорид и калий. Кальций, фосфор и магний важны для костей, а сера помогает стабилизировать белковые структуры в человеческом организме.

Влияние питания на развитие заболеваний. Рацион питания оказывает огромное влияние на работу всех органов и систем организма. Длительный дефицит или избыток определенных питательных веществ может приводить к развитию различных патологий, затрагивающих иммунную, сердечно-сосудистую, эндокринную, пищеварительную и другую систему. Нерациональное питание ослабляет защитные механизмы организма, повышает риск воспалительных процессов, ухудшает метаболизм.

В данной работе рассматривается влияние пищевых факторов на развитие ряда наиболее распространенных заболеваний, в основе которых лежат алиментарные нарушения. К ним относятся: частые ОРВИ, ОРЗ и грипп, дисбактериоз кишечника, аллергические заболевания, избыточный вес, анемия, повышенная утомляемость и снижение работоспособности, сердечно-сосудистые болезни, заболевания щитовидной железы.

Частые ОРВИ, ОРЗ и грипп могут быть следствием недостатка белка, витаминов А, С, D и группы В, а также микроэлементов, таких как цинк и селен, которые участвуют в формировании иммунного ответа. Употребление достаточного количества белка (мяса, рыба, яйца, молочная продукция), а также продуктов, которые богаты витамином С (как правило, цитрусовые, а также ягоды и капуста) и витаминов D (жирная рыба, яйца), способствует укреплению иммунной системы и снижению риска вирусных инфекций.

Дисбактериоз кишечника развивается при избытке простых углеводов, недостатке клетчатки и пробиотиков, что приводит к нарушению баланса микрофлоры. Включение в рацион клетчатки (овощи, фрукты, цельнозерновые продукты), пробиотических продуктов (молочные продукты или квашеная капуста) и ограничение сахара помогают нормализовать кишечную среду и предотвратить развитие дисбактериоза.

Аллергические заболевания могут усугубляться дефицитом омега-3 жирных кислот, витамина D и антиоксидантов. Регулярное употребление жирной рыбы (например, лосось или скумбрия), орехов, а также продуктов, которые богаты антиоксидантами (ягоды, шпинат), помогает снизить воспаление и поддержать иммунную систему организма.

Избыточный вес является следствием избыточного потребления калорий, быстрых углеводов и жиров. Контроль калорийности рациона (соблюдение дефицита калорий), уменьшение количества простых углеводов, а также увеличение доли белка и клетчатки способствует поддержанию нормального веса и предотвращению ожирения.

Анемия развивается при недостатке железа, витаминов В12 и фолиевой кислоты, что приводит к снижению уровня гемоглобина. Употребления продуктов, которые богаты железом (например, печень или мясо), в сочетании с витамином С (цитрусовые или ягоды) улучшает усвоение железа и помогает предотвратить заболевание.

Повышенная утомляемость и снижение работоспособности могут быть вызваны нехваткой железа, магний, витаминов группы В и омега-3. Регулярное употребление продуктов богатых магнием (например, орехи или бананы), жирной рыбы и витаминов В6, В12 (мясо, яйца, молочные продукты) поддерживает энергетический обмен и когнитивные (познавательные) функции.

Сердечно-сосудистые заболевания возникают при избытке насыщенных жиров, трансжиров, соли и сахара, что приводит к таким заболеваниям, как атеросклероз и гипертония. Для поддержки здоровья сердца и сосудов необходимо включать в рацион ненасыщенные жиры (например, рыба или орехи), а также увеличить потребление клетчатки.

Кариес развивается при избыточном потреблении сахара, а также при недостатке кальция в организме. Для того чтобы снизить риск развития данного заболевания, а также укрепить зубную эмаль, необходимо ограничить потребление сладкого и добавить в рацион рыбу и молочные продукты.

Заболевания щитовидной железы связаны с недостатком таких минералов, как йод, селен и железо, что в свою очередь приводит к нарушению выработки гормонов. Для нормализации работы щитовидной железы необходимо включить в рацион морепродукты, а также контролировать уровень железа в крови.

Применение методов машинного обучения в анализе пищевых привычек и диагностике заболеваний. Питание сильно влияет на здоровье людей, но чтобы точно понять, как именно еда связана с болезнями, нужно учитывать много различных факторов: особенности организма, активность, наличие наследственных заболеваний. Благодаря технологиям и машинному обучению можно собирать и обрабатывать большие объемы данных. В частности, нейронные сети демонстрируют высокую эффективность в выявление сложных взаимосвязей между пищевыми привычками и рисками заболеваний. Они находят связь между тем, как человек питается и какими болезнями может заболеть. В работе рассматривается разработка системы анализа питания (прогнозирование алиментарно-зависимых заболеваний) с использованием нейронных сетей.

Подготовка данных. Для обучения модели использовались данные, содержащие информацию о пищевых привычках, потреблении микро- и макроэлементов, а также биологически активных веществ. Помимо этого учитывались антропометрические показатели (рост, вес, объемы) пациентов.

В качестве целевой переменной выступал бинарный показатель наличия или отсутствия заболевания (метка 1 – заболевание есть или возможно, метка 0 – заболевание отсутствует). Перед обучением данные были нормализованы с использованием стандартизации (StandardScaler позволят удалить среднее значение и масштабировать данные до единичной дисперсии), что позволило повысить стабильность работы модели.

Для балансировки классов был применен алгоритм SMOTEENN [6]. Он сочетает Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE), который генерирует синтетические примеры для меньшинства классов, и Edited Nearest Neighbors (ENN), которые позволяют устранить шумовые данные. Такой подход улучшает качества классификации, особенно при наличии дисбаланса между здоровыми и больными пациентами (число здоровых пациентов гораздо выше числа тех, у кого есть болезнь).

Архитектура модели. Разработанная модель представляет собой глубокую нейронную сеть с несколькими полносвязными слоями:

- 1) входной слой принимает данные о нутриентах, макро- и микроэлементах, а также антропометрические показатели пациентов;
- 2) скрытые слои, использующие функцию активации ReLU, нормализацию (Batch Normalization) и дропаут (Dropout) для предотвращения переобучения;
- 3) выходной слой с одной нейронной сигмоидной функцией активации, что позволяет интерпретировать результат как вероятность наличия заболевания.

Для улучшения качества обучения была использована модифицированная функция потерь Focal Loss, которая снижает влияние легко классифицируемых примеров (когда заболевание отсутствует) и акцентирует внимание модели на сложных случаях.

Обучение и оценка модели. Обучение модели проводилось с использованием оптимизатора Adam [7] и ранней остановки (Early Stopping), чтобы предотвратить переобучение и сохранить наилучшие параметры. После завершения обучения модель была протестирована на отдельной выборке, а ее качество оценивалось с использованием точности (accuracy), отчёта классификации (classification report) и матрицы ошибок (confusion matrix).

Применение модели. Разработанная система позволяет медицинским специалистам анализировать пищевые привычки пациентов и оценивать потенциальные риски различных заболеваний, включая частые ОРВИ, ОРЗ и грипп, дисбактериоз кишечника, аллергические заболевания, избыточный вес, анемию, повышенную утомляемость и снижение работоспособности, сердечно-сосудистые болезни, заболевания щитовидной железы.

Использование машинного обучения в данной области значительно расширяет возможности диагностики, поскольку нейронная сеть способна выявлять сложные нелинейные зависимости между нутриентами и здоровьем человека.

Взаимодействие с моделью. Для взаимодействия с моделью нейронной сети был разработан пользовательский интерфейс. На рис. 1 представлена страница с запуском процедуры анализа.

Рис. 1. Страница анализа заболеваний

Пользователь заполняет имя пациента и выбирает из выпадающего списка необходимые заболевания, анализ которых требуется выполнить. На рис. 2 представлен выбор заболеваний.

Рис. 2. Выбор заболеваний для анализа

После выбора заболеваний перед пользователем появятся поля для заполнения параметров, на основании которых будет выполняться анализ. На рис. 3 представлено заполнение анализируемых параметров.

Рис. 3. Заполнение анализируемых параметров

После заполнения параметров и нажатия кнопки «Запустить» перед пользователем появится модальное окно с результатами анализа (рис. 4).

Результаты анализа

Имя пациента	Заболевание	Введенные данные	Результат	Время
Иванов	Излишний вес	26ПП: 1, Возраст: 24, Группа ФА: 1, ИМТ: 20, Калорийность: 2100, Масса ежедневно потребляемой пищи: 3000, Простые сахара: 100	✗	2025-04-28 17:00:06

ЗАКРЫТЬ

Рис. 4. Окно с результатом анализа

На рис. 5 представлена страница со всеми имеющимися результатами анализов.

Система прогнозирования рисков АЗЗ Главная Анализ Результаты					
Имя пациента	Заболевание	Данные	Результат	Дата анализа	
Иванов	Излишний вес	26ПП: 1, Возраст: 24, Группа ФА: 1, ИМТ: 20, Калорийность: 2100, Масса ежедневно потребляемой пищи: 3000, Простые сахара: 100	✗	2025-04-28 17:00:06	

Записей на странице: 10 1-1 из 1

Рис. 5. Страница «Результаты»

Результаты

Разработанная модель продемонстрировала высокую точность в классификации заболеваний на основе анализа пищевых привычек. Матрица ошибок и метрики показали, что модель способна эффективно выявлять пациентов с повышенным риском заболеваний.

Подтверждена высокая корреляция между уровнем потребления нутриентов и вероятностью развития заболеваний.

Система успешно использует алгоритмы машинного обучения для персонализированного анализа питания. Модель можно использовать в качестве вспомогательного инструмента для диетологов.

Для взаимодействия с моделью был разработан интуитивно понятный интерфейс.

Выводы и заключение

В ходе исследования разработана система анализа питания, которая способна выявлять закономерности между пищевыми привычками и классифицировать заболевания.

Анализ показал, что рацион питания оказывает значительное влияние на здоровье человека, а его корректировка может снизить риски различных заболеваний.

Использование машинного обучения, в частности, нейронных сетей позволяет эффективно анализировать большие объёмы данных и автоматически предсказывать возможные патологии на основе пищевых привычек.

Полученные результаты могут быть использованы в клинической практике для диагностики и профилактики заболеваний, а также для разработки персонализированных рекомендаций по питанию.

Список источников

1. Нутрициология и клиническая диетология : нац. руководство / под ред. В. А. Тутельяна, Д. Б. Никитюка. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2020. 31 с.
2. Адаменко Е. И., Силивончик Н. Н. Оценка статуса питания : учеб.-метод. пособие. Минск : БГМУ, 2009. 20 с. ISBN 978-985-528-071-3.
3. Алиментарные заболевания. URL: <https://propionix.ru/alimentarnye-zabolevaniya> (дата обращения: 08.02.2025).
4. В чем польза белков, жиров и углеводов. URL: <https://www.obedsmile.ru/blog/v-chem-polza-belkov-zirov-i-uglevodov.html> (дата обращения: 10.02.2025).
5. Все о витаминах и минералах. URL: <https://goo.su/fPkGnq> (дата обращения: 11.02.2025).
6. SMOTEENN. URL: <https://goo.su/zjznyCf> (дата обращения: 10.02.2025).
7. Adam. URL: <https://goo.su/nzewkE> (дата обращения: 10.02.2025).

УДК 547.458.2:595.77

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-56-58

Получение хитозана из личинок *Hermetia illucens* как альтернативного источника биополимера

Chitosan extraction from *Hermetia illucens* larvae as an alternative source of biopolymer

А. П. Михеева, У. А. Филиппова

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

A. P. Mikheeva, U. A. Filippova

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Работа посвящена исследованию возможности получения хитозана из личинок *Hermetia illucens* (чёрной львинки), что рассматривается как инновационная альтернатива традиционным морским источникам хитина. Проведён анализ динамики накопления хитина на различных стадиях развития личинок, описана методика его извлечения и деацетилирования. Также представлена эффективность выхода хитозана и приведены потенциальные области его применения. По результатам исследования подтверждена высокая рентабельность и экологическая устойчивость данного подхода.

Ключевые слова: хитозан, хитин, *Hermetia illucens*, личинки, экзоскелет, биополимеры

Abstract. This paper explores the possibility of extracting chitosan from *Hermetia illucens* (black soldier fly) larvae as an innovative alternative to traditional marine sources of chitin. The study analyzes chitin accumulation dynamics at different larval growth stages, describes the methodology for chitin isolation and its deacetylation, and presents the efficiency of chitosan yield. The research confirms the high cost-effectiveness and environmental sustainability of this approach.

Keywords: chitosan, chitin, *Hermetia illucens*, larvae, exoskeleton, biopolymers

Введение

Хитозан представляет собой биологически активный полисахарид, получаемый путём деацетилирования хитина – структурного компонента экзоскелета беспозвоночных. Благодаря его биоразлагаемости, нетоксичности, антимикробным и плёнообразующим свойствам, хитозан широко применяется в медицине, сельском хозяйстве, пищевой и косметической промышленности. Традиционно сырьём для его получения служат панцири креветок, крабов и других морских организмов. Однако эти источники имеют ряд существенных ограничений: сезонность, аллергенность, высокие логистические и утилизационные затраты.

В связи с этим всё большее внимание уделяется альтернативным видам сырья, особенно насекомым. Одним из наиболее перспективных является *Hermetia illucens* (чёрная львинка) – насекомое, отличающееся быстрым ростом, способностью к утилизации органических отходов и высокой долей хитина в теле на поздних стадиях развития. Исследования последних лет показали, что хитин насекомых по составу и свойствам сопоставим с морским, а технология его переработки может быть адаптирована для масштабного применения.

Биологические особенности личинок *Hermetia illucens* и динамика накопления хитина

Личинки *Hermetia illucens*, или чёрной львинки, привлекают внимание исследователей как источник не только белка и жиров, но и полисахаридов, прежде всего – хитина. Благодаря высокой скорости роста (жизненный цикл при оптимальных условиях – 30–40 дней), устойчивости к патогенам и способности питаться органическими отходами, они считаются экологически выгодным объектом биотехнологической переработки.

Хитин накапливается в кутикуле личинок, которая выполняет защитную и скелетную функции. По мере линек и роста утолщается экзоскелет и увеличивается плотность кутикулы. Исследования показывают, что к пятому возрасту (5-й инстар) и предкукольной стадии уровень хитина достигает наибольшего значения, составляя от 18 до 22% от сухой массы тела.

Дополнительно следует отметить, что структура хитина насекомых преимущественно α -конфигурации, аналогична хитину ракообразных, но с меньшей степенью минерализации, что облегчает процессы экстракции.

Также хитин львинки содержит меньше белковых примесей, чем у морских организмов, что снижает количество этапов очистки.

Биомасса личинок легко масштабируется в промышленных установках и не требует применения кормов животного происхождения. Это делает *H. illucens* пригодной не только для получения хитина, но и для реализации принципов экономики замкнутого цикла и устойчивого производства.

Таким образом, наибольший выход и качество хитина достигаются при переработке личинок на поздних стадиях, что делает выбор сырья критическим фактором эффективности всей технологии.

Методика получения хитозана из личинок чёрной львинки

Получение хитина

Для получения хитина использовались высушенные личинки пятого возраста массой 50 г. Их экстрагировали в течение 16 часов 200 мл 85% фосфорной кислоты при комнатной температуре. После фильтрации и промывки 40% раствором той же кислоты, фильтрат разбавляли водой (3 л) до образования осадка. Полученный осадок декантировали до pH 5,5–6,0, лиофильно высушивали, и в итоге получали 2,75 г аморфного хитина.

Получение хитозана

Стадия деацетилирования проводилась в два этапа. На первом – 2,75 г хитина обрабатывали 110 мл 50% раствора NaOH при 100 °C на водяной бане в течение двух часов. После промывки и высушивания было получено 1,32 г хитозана. Повторная обработка аналогичным раствором в объёме 52 мл позволила получить 1,27 г высокоочищенного хитозана с остаточным содержанием белка менее 0,3%. Эта ступенчатая методика позволяет добиться высокой степени деацетилирования и улучшенных характеристик конечного продукта.

Потенциальные области применения хитозана

Хитозан благодаря своей биоактивности, низкой токсичности и способности к химическим модификациям рассматривается как один из наиболее универсальных биополимеров. Потенциал его применения постоянно расширяется, включая как классические отрасли (медицина, пищевая промышленность), так и инновационные направления (биотекстиль, носители генетического материала и др.).

В медицине

- **Гемостатические материалы.** Хитозан ускоряет свёртывание крови за счёт положительно заряженной структуры, которая взаимодействует с тромбоцитами и эритроцитами, способствуя образованию сгустка.

- **Антимикробные повязки и покрытия.** Благодаря полиэлектролитной природе, он нарушает мембранный потенциал микробных клеток, подавляя рост широкого спектра бактерий и грибов.

- **Наноформы доставки лекарств.** Хитозан легко формирует микросферы, наночастицы и гидрогели, способные инкапсулировать биоактивные молекулы. Применяется для транспортеров инсулина, антибиотиков, антиканцерогенных препаратов.

- **Хирургические имплантаты.** Из хитозана формируют рассасывающиеся швы, покрытия эндопротезов и каркасы для тканевой инженерии.

В сельском хозяйстве

- **Фитопротекторы и индукторы устойчивости.** Обработка растений хитозаном активирует синтез фитоалексинов и защитных белков, усиливая иммунный ответ. Это позволяет снизить использование химических пестицидов.

- **Носители удобрений и пестицидов.** Хитозан используется как матрица для замедленного высвобождения агрохимикатов.

- **Обработка семян и корней.** Покрытие семян или корневой системы повышает всхожесть и защищает от грибковых и бактериальных патогенов.

В пищевой промышленности

- **Съедобные плёнки.** На основе хитозана создаются биоплёнки для упаковки мяса, сыра, овощей. Такие покрытия продлевают срок хранения за счёт барьерных и антимикробных свойств.

- **Стабилизаторы и осветлители.** В напитках (вино, фруктовые соки) хитозан связывает белки и фенолы, облегчая фильтрацию и улучшая прозрачность.

- **Диетические добавки.** Хитозан адсорбирует липиды в ЖКТ, снижая уровень холестерина и способствуя снижению массы тела. Это делает его популярным компонентом функционального питания и средств для контроля веса.

Перспективные направления

- **Биотекстиль.** Хитозан используется для модификации тканей, придавая им антибактериальные и противогрибковые свойства.

- **Очистка сточных вод.** Благодаря способности связывать тяжёлые металлы и красители, хитозан активно применяется в водоочистке.

- **Косметика.** Используется в шампунях, кремах, средствах по уходу за кожей как увлажняющий и защитный агент.

Таким образом, хитозан, особенно полученный из альтернативных источников, таких как *Hermetia illucens*, обладает широчайшим спектром применения, открывая новые возможности для биоэкономики и устойчивого развития.

Расчёт эффективности выхода хитозана

$$\text{Эффективность выхода} = \frac{100 * 1,27}{50} = 2,54\%$$

При использовании 50 г сухих личинок было получено 2,75 г хитина, из которого затем выделено 1,27 г очищенного хитозана. Таким образом, общий выход составил 2,54% от исходной массы сырья. Это превышает показатели традиционных методик, где выход не превышает 1,8%.

Заключение

Получение хитозана из личинок *Hermetia illucens* представляет собой технологически обоснованный и экологически рациональный метод переработки органических отходов в высокоценный биополимер. Исследование подтвердило, что на стадии предкуколки личинки содержат до 20% хитина, что делает их эффективным источником сырья. Разработанная методика позволяет получать хитозан с высокой степенью чистоты и пригодностью к дальнейшему использованию в медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Учитывая высокий выход конечного продукта и универсальность его применения, предложенная технология может быть успешно масштабирована и внедрена в производственную практику.

Список источников

1. Physicochemical and antibacterial properties of chitosan extracted from waste shrimp shells / J. C. Vilar Junior, D. R. Ribeaux, C. A. Alves da Silva [et al.] // International Journal of Microbiology. 2016. Vol. 2016, № 1. P. 5127515.
2. Current state of chitin purification and chitosan production from insects / T. Hahn, E. Tafi, A. Paul [et al.] // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2020. Vol. 95, no. 11. P. 2775–2795.
3. Biopreservation of shrimps using composed edible coatings from chitosan nanoparticles and cloves extract / A. A. Tayel, A. F. Elzahy, S. H. Moussa [et al.]. DOI: 10.1155/2020/8878452 // Journal of Food Quality. 2020. Vol 2020, no. 1. P. 8878452.
4. Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed – A review / K. B. Barragan-Fonseca, M. Dicke, J. J. Van Loon // Journal of Insects as Food and Feed. 2017. Vol. 3(2). P. 105–120.
5. Van Huis A., Oonincx, D. G. A. B. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review // Agronomy for Sustainable Development. 2017. Vol. 37. P. 47.
6. Chitosan in plant protection / A. El. Hadrami, L. R. Adam, I. El. Hadrami [et al.] // Marine drugs. 2010. Vol. 8, no. 4. P. 968–987.
7. Rinaudo M. Chitin and chitosan: Properties and applications // Progress in polymer science. 2006. Vol. 31, no. 7. P. 603–632.

Язык программирования C++ в вычислительных задачах

C++ programming language in computing problems

А. В. Никонов, О. Г. Бородина, Ю. Г. Лагунова

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

A. V. Nikonov, O. G. Borodina, Yu. G. Lagunova

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Приведены результаты практических исследований особенностей языка C++ при вычислении громоздких математических формул. Программой с консольным вводом параметров и выводом на экран результата в виде «аргумент», «значение аргумента» и «значение функции» находились значения функций по заданным формулам. Целью работы является оценка влияния типизации языка C++ на безопасность работы программы. Задача работы – экспериментальное исследование статической типизации языка. Актуальность исследования в выработке рекомендаций к устойчивости процесса разработки и предупреждению коллизий в ходе вычислений. Область применения полученных результатов – проектирование программных систем (выбор языка программного проекта и методики кодирования).

Ключевые слова: язык программирования C++, типизация языка программирования, точность вычислений, время выполнения, неоднозначность типизации

Abstract. The article presents the results of practical studies of the C++ language features when calculating cumbersome mathematical formulas. The program with console input of parameters and output of the result to the screen in the form of "argument", "argument value" and "function value" found the values of functions according to the given formulas. The aim of the work is to assess the impact of C++ language typing on the safety of the program. The objective of the work is an experimental study of static typing of the language. The relevance of the study is in developing recommendations for the sustainability of the development process and preventing collisions during calculations. The scope of application of the obtained results is the design of software systems (choosing the language of the software project and coding methods).

Keywords: C++ programming language, programming language typing, computational accuracy, execution time, typing ambiguity

Введение

В ходе программного решения всевозможных научных задач и установления точных сведений о параметрах процессов в области астрономии, космических проектов, нанотехнологий, генетики, и т. п., используются самые различные данные об исследуемых объектах. По сути, в программировании задействованы положения теории систем типов, когда производится классификация элементов множества данных на основе системы типов языка, что является формальной базой в разработке программ. В приводимом материале затрагиваются лишь особенности практического применения системы типов языка C++ как отражение отдельных положений математической теории типов. Система типов языка C++ задана его синтаксисом и поведением компилятора, что и предопределяет типизацию языка.

Для на реализации громоздких математических расчетов может быть использован ряд современных языков программирования. К ним можно отнести, в первую очередь, язык Fortran (2018; 2023) [1, 2]. За более, чем 60-ти летний период развития этого языка наработано очень большое количество математических библиотек. Созданные программные пакеты используются и ныне для решения научных задач. Компилятор ф. Intel (Intel Fortran Compiler) дает возможность работать на платформах IA-32, x86_64, а также на IA-64 для серверов.

В случае, если от языка программирования требуется высокая скорость выполнения задач при ограниченных вычислительных ресурсах, то в этом случае можно обратить внимание на языки C и C++ [3]. Язык C++ компилируется в машинный код, за счет чего повышается скорость работы программ. Также, он поддерживает многопоточное программирование и имеет открытый исходный код. Как язык объектно-ориентированного программирования, C++ поддерживает всевозможные абстракции как оборудования, так и кода, что делает программы эффективными. Этот язык, за счет динамической системы типов, проводит быстрые проверки при исполнении программ. Ошибки типов обнаруживаются компилятором на стадии компиляции, избавляя от последующих ошибок, проявляющихся при тестировании, отладке и эксплуатации.

Язык C++ не имеет автоматической сборки мусора, утечка памяти нивелируется за счет интеллектуальных указателей в ходе ручного управления использованием памяти. За счет этого, скорость исполнения программ C++ выше, чем программ на языках C# и Java [4, 5].

Характерная особенность языка C++ – это признаки и языка высокого уровня, и языка низкого уровня, что дает возможность применять его во встраиваемых программных модулях. Отсюда способность прямого обращения к аппаратной части компьютерных систем [6].

В связи с этим, материал статьи посвящен исследованию особенностей применения языка C++ к вычислению сложных формул, оценке влияния системы типов языка на безопасность работы программы и устойчивость процесса разработки.

Теория

Материал данной работы отражает поведение языка C++ в случае некорректных приведений типов элементов множеств данных. Способность противостоять таким некорректным приведением типов обычно классифицируют как сильная или слабая типизация [7].

Язык C++ выполняет проверку типов сразу на этапе компиляции, что должно обеспечивать корректность реализуемого алгоритма в соответствии с теорией типов. Такую реализацию положений теории типов в языке называют статической типизацией. На сложность реализации такого подхода указывает то, что абсолютная гарантия корректности кода после компиляции отсутствует.

Сложность статической типизации, к которой относят язык C++, выражается громоздкостью и сложностью проверки всего, что написано в исходном коде. Поэтому компилятор в своей работе зачастую использует как конструкцию, так и место использования и вложенность выражений и переменных, позволяющих уменьшить трудоемкость при определении типов для указанных термов. То есть, в таких случаях компилируемый код оказывается статически типизируемым, но неявным образом. По этой причине необходимо знать свойства такой неявной типизации, реализованной в конкретном компиляторе.

Иерархическое дерево типизации, базирующееся на наследовании классов в объектно-ориентированном программировании, обуславливает силу системы типов языка, так как при этом существует смысловая связь различных конкретных типов, а также методов и свойств элементов классов, что обуславливает однозначное определение функции, класса, метода и интерфейс среди других схожих. Но когда преобразование типов выполняется автоматически, не преследуется задача придания конкретного типа элементам кода, а учитывается только наличие методов и свойств с требуемым объявлением функций и методов, их параметров. То есть, при автоматическом преобразовании типов учитываются сведения об аргументах, передаваемых в функции, и методы, а также их типы, названия и сведения о возвращаемых значениях. В информационных источниках для такого автоматического преобразования типов иногда используют профессионализм «утиная» типизация.

Семантически понятно, что такая автоматическая типизация слабее иерархической. Нужно отметить, что язык C++ не имеет корневого базового типа, от которого наследуются все остальные. Язык содержит множество базовых (встроенных) типов: например, числовые типы (int, double, long, bool), а также типы для символов ASCII-кода (char) и юни-кода (wchar_t). В основном целочисленные базовые типы (кроме bool, double, wchar_t и связанных с ними) имеют unsigned версии (целочисленный без знака), изменяющие диапазон значений для переменной. Эти типы заданы стандартом языка и встроены в компилятор, и не определены в файле заголовка программы. Компилятор распознает базовые встроенные типы и работает с ними по правилам в соответствии с управляющими операциями для данных типов, и преобразовывает одни базовые типы в другие.

На основании изложенного, для практической работы необходимо знать особенности поведения языка C++ для уменьшения количества возвратов компилятора при несоответствии типов, ведь и в этом строго типизированном статически проверяемом языке несоответствия типов, обнаруженных при компиляции, блокируются компилятором в повальном числе некорректных программ, но не в абсолютно всех. Нужно учитывать, что семантика языка C++, как промышленного языка, рассматривается путем неформальных рассуждений.

Результаты

В работе приведены результаты экспериментальной оценки особенностей языка C++ при вычислении сложных формул. Вычислялось значение функции по заданной формуле с консольным вводом параметров

и выводом на экран результата. Целью исследований ставилась оценка влияния типизации языка C++ на безопасность работы программы и на устойчивость процесса разработки к коллизиям. Учитывалось, что в C++ типы данных переменных и функций задаются в ходе написания кода, и затем при компиляции. Собственно работа программы не может изменить тип данных в той или иной переменной или функции. В программах, использованных в исследованиях, количество операций не зависело от объема входных данных было неизменным при допустимых значениях аргументов за счет фиксированного числа вычислений и отсутствия циклов, зависящих от входных параметров.

В ряде программ для точных вычислений был использован статический тип данных с плавающей точкой `double`, позволяющий представлять переменные в формате до 15–16 значащих цифр в широком диапазоне значений, и занимающий в памяти 8 байт. Такое решение обусловлено наличием операций с погрешностями (`pow`, `sqrt` и деление). Так как тип данных ключа контейнера `map` не меняется после инициализации, и внешняя библиотека `tabulate` работает со строковыми типами данных, а все численные типы данных приведены к строковым функцией `to_string`. Корректное преобразование к типу `double` наблюдалось при указании точности числа функцией `setprecision`, например `std::numeric_limits<double>::digits10`.

Как следствие статически типизированного языка C++, в исследованиях в разработанных программах типы переменных (`double`) и функций определяются явно и проверяются компилятором. А неявное преобразование типов между несовместимыми (например, присвоить значение типа `int` переменной типа `double`) без явного преобразования не приводит к ошибке компиляции, а в случае несовместимых типов (например, `int` и `string`), это невозможно без явного преобразования.

Но неявные преобразования типов при арифметических операциях между числами разных типов выполняются: типы `double` и `int` разрешены в арифметических операциях без явного преобразования. А попытка ввести строку вместо числа приводит к ошибке. Результат преобразования может формироваться разработанной функцией `isValidInput()` (ниже):

```
bool isValidInput() {
    if (cin.fail()) {
        cin.clear();
        cin.ignore(numeric_limits<streamsize>::max(), '\n');
        cout << "Ошибка: введите корректное число!" << endl;
        return false;
    }
    return true;
}
```

Точность работы с числами с плавающей запятой, обусловлена тем, что типы данных контролируются с учетом погрешности (`epsilon`) на этапе компиляции и выполнения, что относит язык C++ к сильной статической типизации. Точность расчетов на основе вводимых числовых значений может проверяться разработанной функцией `isValidDiscrete(value, start, step)`, проверяющей значение числа с учетом погрешности (`epsilon = 1E-9`):

```
bool isValidDiscrete(double value, double start, double step) {
    const double epsilon = 1e-9;
    double diff = fabs(value - start);
    double remainder = fmod(diff, step);
    return remainder < epsilon || fabs(remainder - step) < epsilon;
}
```

Неявное преобразование типов наблюдалось при выполнении арифметических операций между числами разных типов (`int` и `double`) – происходит автоматическое преобразование к более широкому типу (`double`), например:

```
double result = (((a * x / b) * x / c) * x / d) * x .
```

В программах иррациональные константные переменные (из-за дробных степеней чисел) инициализированы при объявлении функцией `pow()`, возвращающей основание, возведенное в показатель степени, что ве-

дет к устойчивости кода и максимизации точности, например: `const double x = pow(3, 1.0/3);`. Здесь числовые значения автоматически преобразуются в тип `double` – происходит неявное преобразование.

Обработка пользовательского ввода реализована с использованием класса `string`, что обеспечивает возможность для проверки и преобразования вводимых данных. В отличие от работы с массивами символов (`char[]`), таким образом обеспечены безопасность от переполнения буфера и реализация методов обработки строк. Разработанная функция `getValidInput` (ниже) использует `getline(cin, input)` для считывания всей строки ввода, и дает возможность обработать пустой ввод (нажата клавиша Enter), а также преобразовать строку в число с помощью функции `stod()`. Для обработки ошибок используется механизм исключений `try-catch`, что позволяет реагировать на некорректный ввод:

```
double getValidInput(const string& prompt, double minVal, double maxVal, double defaultValue, double step)
{
    double value;
    string input;

    while (true) {
        cout << prompt << " [" << fixed << setprecision(3) << minVal << " - " << maxVal << "]: ";
        getline(cin, input);

        if (input.empty()) {
            return defaultValue;
        }

        try {
            value = stod(input);
            if (value < minVal || value > maxVal) {
                cout << "Ошибка! Значение должно быть между " << minVal << " и " << maxVal << endl;
                continue;
            }
        }
    }
```

Управляющий модуль (функция `main()`) координирует работу модулей, обеспечивает правильную последовательность операций и обработку возможных ошибок на верхнем уровне программы. Логика `main()` обеспечивает минимизацию числа глобальных переменных и явную передачу необходимых данных между модулями через параметры функций.

Ограничение неявных преобразований появляется при наличии пользовательских типов – неявные преобразования невозможны: так при использовании пользовательских классов требуется явное определение операторов преобразования.

В ряде программ, направленных на экономию памяти, для хранения данных выбраны статические типы переменных `float` и `byte`, что позволило сократить потребление ресурсов без потери необходимой точности вычислений. Тип `double` был принят для аргументов и вычислений, обеспечивая представление результатов при мантиссе в 52 бита, экспоненте из 11 бит, и для знака один бит. Для этих программ при оценке погрешности вычислений использован «Онлайн решатель математических задач «Math Solver» [8] (далее образцовое средство), который вычисляет значение заданной формулы, и результат его работы принят за действительное значение. Точность вычислений, в пределах десяти знаков после запятой, задавалась функцией `SetPrecision()`, устанавливающей количество десятичных знаков для результата с плавающей точкой.

Для неотчетливых вычислений, при представлении результатов четырьмя знаками после запятой, контрольные примеры работы программы дали следующие погрешности:

1) при минимальных значениях аргументов формулы отличие от показаний образцового средства появилось в четвертом знаке после запятой, а погрешность вычисления составила (примерно) $5,7758E^{-4}$ процента (0,0006 %);

2) при максимальных значениях аргументов формулы отличие от показаний образцового средства появилось в пятом знаке после запятой, а погрешность вычисления составила (примерно) минус $6,8032\text{E}^{-2}$ процента (минус 0,0006 %). Изменение значения и знака погрешности связано с наличием аргументов малых значений, возводившихся в степени третьего – пятого порядков, что приводило к исчезающе незначительному вкладу в результат вычислений значащих цифр младших разрядов числа вследствие их малости, даже при их представлении типом `double` (8 байт).

В то же время, погрешности вычислений на нижних и верхних границах диапазонов аргументов становились близкими при представлении десятию знаками после запятой: (примерно) минус $7,6489\text{E}^{-11}$ процента и (примерно) минус $10,5911\text{E}^{-11}$ процента.

Также в программах применялся подход разделения задачи (при выборе типа для переменных): тип `float` экономит память при хранении исходных данных, а тип `double` определяет точность конечного вычисления. При этом погрешность вычислений определялась цифрами начиная с шестой после запятой. Погрешность вычислений программой, определенная сравнением с образцовым средством, имела значение $7,7133\text{E}^{-6}$ процента (примерно 0,000008 %). Эта погрешность является следствием использованием типа `float` для экономии памяти, а числа, полученные с большим количеством знаков после запятой, результат извлечения корня конкретной степени.

Обсуждение результатов

Сильная типизация языка C++ ограничивает неявные преобразования между типами: в работе выполнено явное преобразование пользовательского ввода (строки) в числовой формат с помощью функции `stod()`, в то же время компилятор заблокировал автоматическое преобразование `std::string` в `double`.

Для безошибочной компиляции, правила языка требуют явно указать тип данных переменной. В такой ситуации для программы операционная система/компилятор явно задают область памяти для конкретного типа данных и обуславливают читаемость кода при отладке. В рамках конвергенции статических и динамических языков, C++ выполняет и неявные преобразования по изменению типа данных. Так преобразование типа `double` в тип `int` может выполнено, отбросив дробную часть числа.

Кроме этого, неявная типизация наблюдалось как автоматическое преобразование типов `float` в `double`, простых (необработанных) указателей в булевы значения. Нужно обратить внимание на наличие автоматического вывода типов (`auto`, `decltype`) в современных стандартах языка C++.

Но неявные преобразования не выполняются для сложных и пользовательских типов. При передаче объекта одного класса в функцию, когда ей требуется объект другого класса, компилятор покажет ошибку, которая предотвращается только назначенным для этого оператором преобразования.

А при риске потери данных или неоднозначности преобразования, необходимо выполнять явное сведение типов. То есть, неявные преобразования обеспечивают гибкость языка C++ при высоком уровне безопасности и контроле типов в вычислительных задачах, что подтверждает данная работа.

Выводы и заключение

Полученные авторами результаты исследований позволяют заключить, что знание и умение практического использования системы типов языка C++ крайне важно для совершенствования разрабатываемого кода, безопасности работы программы и эффективности процесса реализации программного проекта.

C++ относят к производственному языку, что подтверждает данная работа: это четко организованный стандартами язык с прогнозируемым результатом компиляции, позволяющий создавать промышленный код. В то же время, результаты исследования математических вычислений говорят, что стандартизированные правила базируются на неформальных положениях, построенных контексте абстрактной логики. Можно утверждать, что статическая типизация языка C++ поддерживает технологию разработки эффективных и богатых семантикой программных модулей.

Строгая система типов языка блокирует присвоение одной и той же переменной разных типов – так при присвоении переменной целочисленного типа значения другого типа, компилятор запрещает его или делает ограниченным. Наблюдается хорошая индикация в виде предупреждений со стороны компилятора о возможной

потере данных, в том числе об изменении сути преобразования. Компилятор отображает возможные ошибки и делает код надежным.

Таким образом, существуют компромиссы в системе типизации языка C++. Статическая проверка типов нивелирует большой класс ошибок, обязывая разработчика строго определять структуры данных. Сильная типизация минимизирует неявные преобразования за счет увеличения объема кода путем явного приведения типов. Исследования по замене типа float на тип double и обратно показали влияние типов на точность вычислений, давая возможность оптимизировать код.

Таким образом, данная работа отражает практическое исследование возможностей и ограничений системы типов языка C++.

Тем не менее, некоторые известные специалисты мировой практики программной инженерии (напр., Линус Торвалдс) критикуют язык C++ и парадигму объектно-ориентированного программирования: «необходимость ограничения программистов в выборе. ... чем меньше у программистов выбора, тем более устойчивым становится их код».

Список источников

1. ISO/IEC 1539-1:2023. Programming languages – FortranPart 1: Base language. URL: <https://www.iso.org/standard/82170.html> (дата обращения: 12.02.2025).
2. ISO/IEC 1539-2:2000(en). Information technology – Programming languages – Fortran – Part 2: Varying length character strings. URL: <https://www.iso.org/standard/26934.html> (дата обращения: 12.02.2025).
3. Страуструп Б. Программирование: принципы и практика использования C++ : пер. с англ. Москва : ООО «ИД Вильямс», 2011. 1248 с.
4. Чашин М. Реализация сборки мусора на C++ // RSDN Magazine #1. 13.03.2005. URL: <https://rdsn.org/article/cpp/GCcpp.xml> (дата обращения: 12.02.2025).
5. Smart-указатели. `unique_ptr<T>`. URL: <https://metanit.com/cpp/tutorial/11.1.php> (дата обращения: 12.02.2025).
6. Kartik Menon. Top 10 Reasons To Learn C++ Language In 2025. URL: <https://www.simplilearn.com/tutorials/cpp-tutorial/learn-cpp> (дата обращения: 03.03.2025).
7. Ликбез по типизации в языках программирования. URL: <https://habr.com/ru/post/161205/> (дата обращения: 03.01.22).
8. Math Solver. URL: <https://math.microsoft.com/ru> (дата обращения: 28.03.2025).

УДК 004.942; 614.841

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-65-70

**Численное моделирование процессов в газовой среде
при пожаре в подземной исследовательской лаборатории**

**Numerical modeling of processes in a gaseous environment
during a fire in an underground research laboratory**

И. Н. Пожаркова, Т. А. Литвинская, Е. Ю. Трояк
*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Железнодорожск, Российская Федерация*

I. N. Pozharkova, T. A. Litvinskaya, E. Yu. Troyak
*Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry
of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation*

Аннотация. В статье рассмотрены особенности численного моделирования с использованием программы Fire Dynamics Simulator процессов, происходящих в газовой среде при пожаре в подземной исследовательской лаборатории. Описана специфика создания расчетной модели, ее характеристики. Результаты исследования процессов в газовой среде на базе построенной модели показали, что глубина заложения подземного сооружения, оказывает значительное влияние на динамику тепломассообмена при пожаре на объекте. Наличие вентиляционного отверстия обеспечивает возможность газообмена между внутренним пространством лаборатории и внешней средой, что создает условия для перехода пожара в квазистационарный режим и стабилизации параметров газовой среды. Максимальная температура газа достигает 600 °С в припотолочной зоне подземной исследовательской лаборатории. Объемная доля кислорода не снижается до значений, необходимых для самопроизвольного прекращения горения. Сделан вывод, что интенсивный газообмен с внешней средой, наблюдающийся с момента начала моделирования, обусловлен наличием перепадов давления и плотности воздуха из-за глубины заложения сооружения. Данную гипотезу подтвердили дополнительные численные эксперименты, проведенные при модификации модели, включающей задание различных нижних координат свободного пространства.

Ключевые слова: численное моделирование, FDS, CFD, пожар, подземное сооружение глубокого заложения, газовая среда, динамика пожара, подземная исследовательская лаборатория

Abstract. The article considers the features of numerical modeling using the Fire Dynamics Simulator program of processes occurring in a gas environment during a fire in an underground research laboratory. The specifics of creating a computational model and its characteristics are described. The results of studying processes in a gas environment based on the constructed model showed that the depth of the underground structure has a significant effect on the dynamics of heat and mass transfer during a fire at the facility. The presence of a ventilation hole provides the possibility of gas exchange between the interior of the laboratory and the external environment, which creates conditions for the transition of the fire to a quasi-stationary mode and stabilization of the parameters of the gas environment. The maximum gas temperature reaches 600 °C in the ceiling zone of the underground research laboratory. The volume fraction of oxygen does not decrease to the values required for spontaneous combustion termination. It is concluded that the intense gas exchange with the external environment, observed from the start of the modeling, is due to the presence of pressure drops and air density due to the depth of the structure. This hypothesis was confirmed by additional numerical experiments conducted when modifying the model, including the specification of various lower coordinates of free space.

Keywords: numerical modeling, FDS, CFD, fire, deep-laid underground structure, gas environment, fire dynamics, underground research laboratory

Введение

Современные тенденции в строительстве включают увеличение количества проектируемых и вводимых в эксплуатацию подземных сооружений. Такой подход является эффективным способом решения проблем городов, связанных с перегрузкой поверхностной застройки территории, и позволяет рационально использовать подземное пространство [1].

Подземные сооружения глубокого заложения представляют собой уникальные объекты, которые выполняют различные функции в зависимости от их назначения. Они могут применяться как для размещения объектов промышленности, инфраструктуры (метро, подземные парковки, склады и хранилища), так и в качестве научных лабораторий, культурных и развлекательных комплексов и т.д. Подобные подземные сооружения строятся на значительной глубине, которая может достигать сотни метров под поверхностью земли [2].

Подземные сооружения глубокого заложения, как и любые другие объекты, обладают своими преимуществами, но также имеют недостатки. Один из наиболее значимых аспектов, требующих особого внимания, заключается в том, что возникновение пожара в таких сооружениях может привести к серьезным последствиям. Это связано с рядом факторов, влияющих на протекание процессов в газовой среде при пожаре, которые имеют отличительные особенности по сравнению с обычными условиями в зданиях, расположенных на поверхности. Во-первых, затруднена естественная вентиляция, что может привести к быстрому снижению видимости и интенсивному распространению токсичных продуктов горения, что, в свою очередь, ухудшает условия эвакуации людей. Во-вторых, из-за повышенной температуры возникает опасность обрушения конструкций.

Более подробно изучить протекание процессов при пожаре в подземном сооружении глубокого заложения позволяет численное моделирование [3, 4], так как проведение натурных экспериментов на указанном типе объектов, зачастую, не представляется возможным.

В настоящее время реализуется строительство подземной исследовательской лаборатории объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов (далее – ПИЛ) в Нижне-Канском скальном массиве на территории Красноярского края [5]. ПИЛ включает горизонтальные горные выработки, расположенные на глубине 450–525 м, соединенные между собой и с поверхностью системой вертикальных стволов и скважин. Длина горизонтального прямолинейного участка выработки значительно превышает размеры поперечного сечения [5]. По геометрическим характеристикам выработки наиболее близки к тоннельным сооружениям со сводчатой формой верхней части и вертикальными стенками (см. рис. 1).

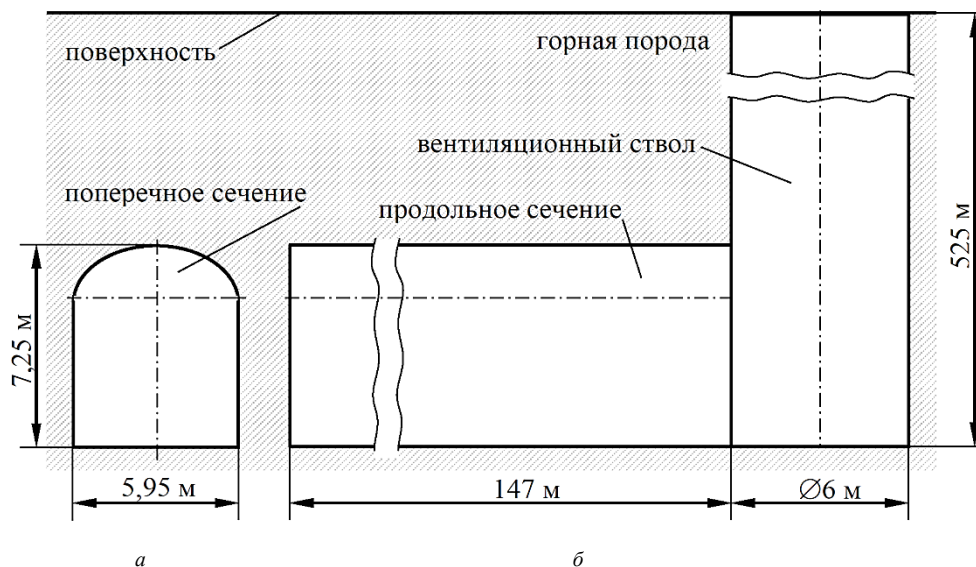


Рис. 1. Ориентировочные проектные размеры горной выработки ПИЛ:
а – поперечное сечение; б – продольное сечение [4]

Для численного моделирования процессов в газовой среде при пожарах в подобных сооружениях широко применяется программа Fire Dynamics Simulator (FDS) [3, 4], которая реализует методы вычислительной гидродинамики (CFD) для описания тепломассопереноса при горении [6]. Это позволяет спрогнозировать динамику развития пожара, распределение температур и концентраций газов в рассматриваемом пространстве, а также оценить тепловое воздействие на конструкции. FDS также позволяет моделировать распространение пламени и горение материалов, что даёт возможность исследовать, как пламя распространяется по поверхности и как оно взаимодействует с окружающей средой.

Теория

В рамках исследования, результаты которого описаны в данном материале, создание трехмерной модели ПИЛ, ввод исходных данных и визуализация результатов моделирования выполнялись на базе программного комплекса Pyrosim, который является оболочкой, реализующей графический интерфейс ядра FDS.

Для подробного изучения протекания процессов в газовой среде при пожаре в ПИЛ с учетом глубины заложения сооружения были построены три расчетные модели: базовая и две ее модификации, отличающиеся нижней координатой свободного пространства.

Построение трехмерной модели включало задание ее геометрических характеристик близкими к ориентировочным проектным размерам ПИЛ, в т.ч. воссоздание арочной формы свода тоннельного сооружения (рис. 1). При этом необходимо было учесть дискретизацию пространства, реализуемую в FDS ортогональными сетками [6]. Согласно рекомендациям разработчиков FDS, количество ячеек сетки в каждом направлении целесообразно принимать кратным $2^l 3^m 5^n$, где l , m и n – целые числа. Таким образом, общее количество ячеек сетки в расчетной модели сооружения составило 1422720. Нижняя координата свободного пространства в базовой модели составляет -525 м, что соответствует глубине заложения горизонтальной горной выработки [5].

Характеристики базовой модели ПИЛ представлены в табл. 1 и 2, а также в табл. 3 перечислены используемые при моделировании измерительные элементы и их расположение. На рис. 2 приведен общий вид модели ПИЛ.

Таблица 1

Размер ячеек сетки расчетной модели пил по осям X, Y, Z

Расположение сетки на модели горизонтальной выработки ПИЛ	Размер ячеек сетки, м		
	X	Y	Z
Зона горения	0,1	0,1	0,1
Нижняя часть модели	0,3	0,3	0,3
Верхняя часть модели	0,1	0,3	0,1

Таблица 2

Параметры базовой модели пил

Параметры ограждающих конструкций [3]					
Толщина, м	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К	Плотность, кг/м³		
0,6	732	2,7	2285		
Параметры вентиляционного отверстия и поверхности горения					
	Вентиляционное отверстие	Поверхность горения			
Расположение	Торцевая часть выработки	Центр основания выработки			
Диаметр, м	6				
Площадь, м²		8,64			
Параметры горючей нагрузки (индустриальное масло) [3]					
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Удельная скорость выгорания, кг/м²·с	Дымообразующая способность, Нп·м²/кг	Удельное потребление кислорода, кг/кг		
42,7	0,043	480,0	–1,589		
Удельное выделение углекислого газа, кг/кг	Удельное выделение угарного газа, кг/кг	Удельное выделение хлороводорода, кг/кг			
1,070	0,122	0			
Условия при моделировании		Толщина слоя жидкости не допускает выгорание вещества за все время моделирования			
		Начальная температура жидкости превышает температуру воспламенения			
Параметры окружающей среды					
Температура воздуха, °С	Давление, Па	Массовая доля кислорода, кг/кг	Плотность воздуха, кг/м³	Теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К)	Относительная влажность воздуха, %
20	101325	0,232378	1,2041	1005	40

Таблица 3

Типы измерительных элементов

Плоскости для построения полей температуры газовой среды и парциальной плотности кислорода (см. рис. 2, в)		
Расположение плоскостей для построения полей	Направление сечения	
	Продольное	Поперечное
В вертикальных сечениях, м (смещение от геометрического центра свободного пространства)	0; -1,8; -2,4	0; ±3; ±12; ±42; ±72
В горизонтальных сечениях, м (смещение от нижней координаты свободного пространства)	+0,6; +3,0; +6,7; +7,2	

Устройства измерения локальных значений параметров газовой среды				
Наименование датчиков	Температура	Тепловой поток	Парциальная плотность кислорода	Объемная концентрация кислорода
Расположение в вертикальных поперечных сечениях модели, м	0; ±3; ±12; ±42; ±72 от геометрического центра свободного пространства модели (см. рис. 2, а, б)			
Устройства измерения локальных значений скорости движения параметров газовой среды				
Наименование параметра устройства измерения скорости движения	Газовая среда	Давление	Плотность	Скорость и массовый расход газа в воздуховоде
Расположение устройства измерения, м	0; ±3; ±12; ±42; ±72 вдоль оси Y (от геометрического центра свободного пространства)			

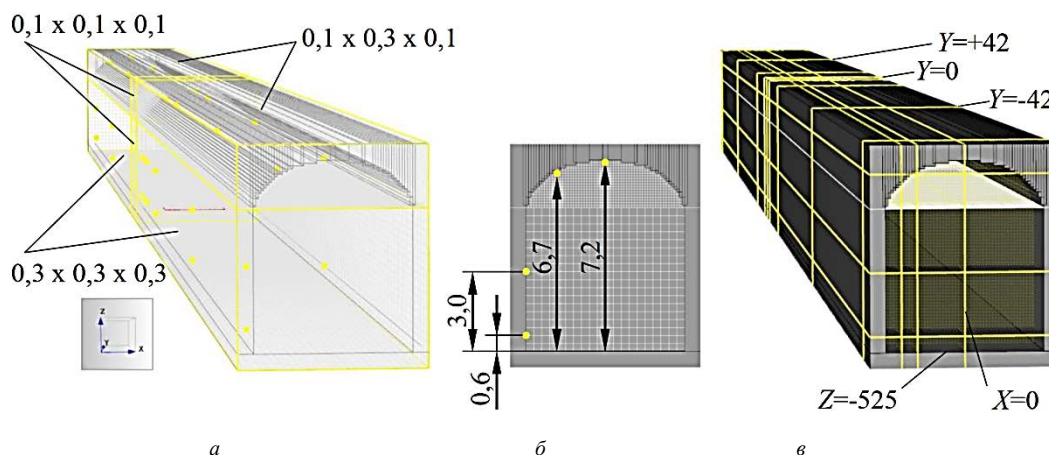


Рис. 2. Модель горизонтальной выработки ПИЛ:
а – ячейки сетки и измерительные датчики; б – расположение измерительных датчиков (м);
в – расположение измерительных плоскостей (м) [3]

Результаты

Анализ полученных результатов моделирования пожара на основе базовой модели ПИЛ показал:

1. Согласно временным графикам температуры газовой среды (рис. 3, а, б) в квазистационарном режиме пожара (после 150 с модельного времени) ее среднее значение составило 305 °С, максимальная температура в припотолочном слое газа над очагом пожара (высота расположения датчика – 6,7 м, 7,2 м) превысила 600 °С, температура в очаге пожара (датчик, расположенный на высоте 3,0 м) достигла 1000 °С.

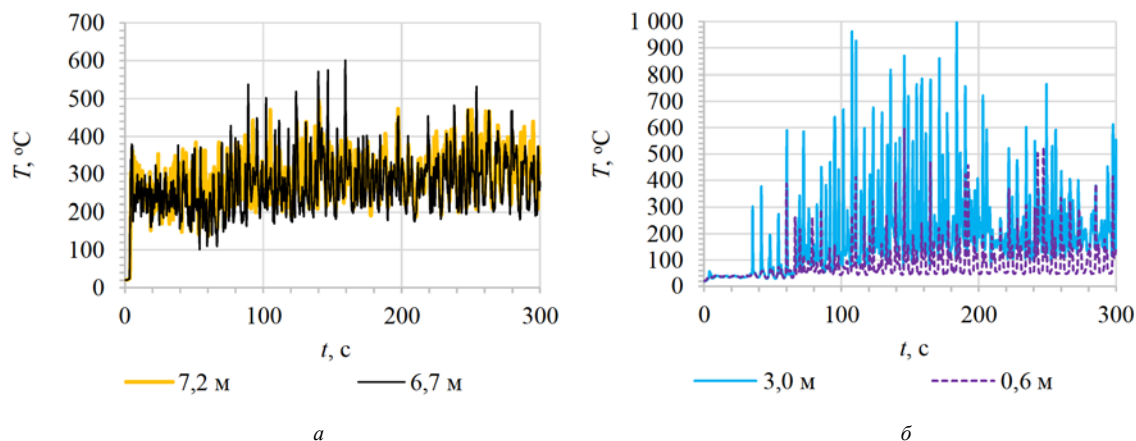


Рис. 3. Временные графики температуры газовой среды T в плоскости $Y = 0$ м:
а – на высоте 7,2 м, 6,7 м; б – на высоте 3,0 м, 0,6 м

2. Не наблюдается затухания пожара вследствие недостатка кислорода, т.к. его объемная доля X_{O_2} не снижается на длительный промежуток времени до значения менее 0,15 моль/моль (рис. 4), необходимого для подавления горения согласно алгоритмам FDS [6].

Анализ временного графика мощности пожара, подтверждает вышесказанное. Временное понижение X_{O_2} не влияет на величину Q , которая в среднем составляет 20 МВт за весь период моделирования (рис. 5).

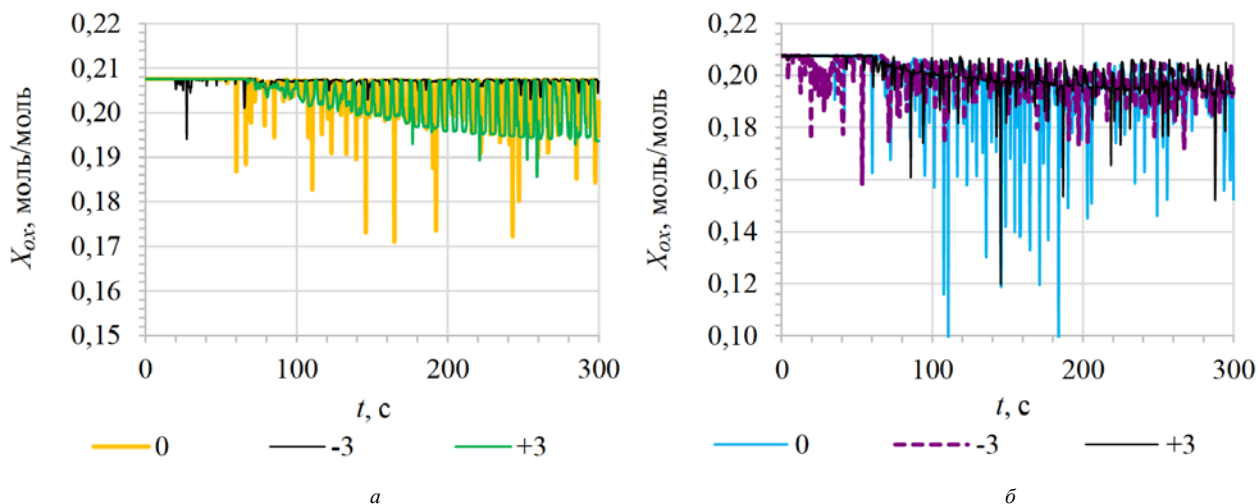


Рис. 4. Временные графики объемной доли кислорода X_{O_2} в плоскостях $Y = 0$ м, $Y = \pm 3$ м:
а – на высоте 0,6 м; б – на высоте 3,0 м

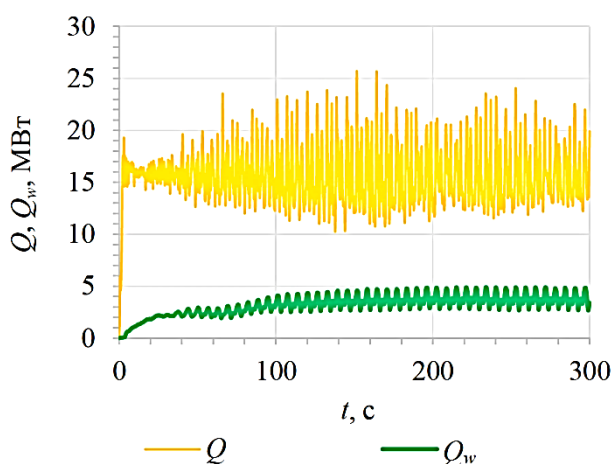


Рис. 5. Временные графики мощности пожара (Q) и количества теплоты, поглощенного ограждениями (Q_w)

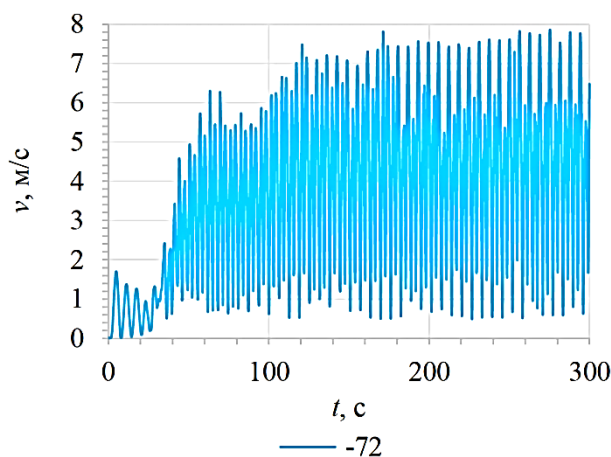


Рис. 6. Временной график нормальной составляющей скорости газа v в плоскости $Y = -72$ м

3. Временной график нормальной составляющей скорости газа v (рис. 6) показывает, что с момента начала моделирования пожара происходит интенсивный газообмен между внутренним пространством ПИЛ и внешней средой, что доказывает влияние на процессы глубины заложения сооружения относительно поверхности. Это обусловлено перепадом давления и плотности воздуха, которые равны 6303 Па и 0,055 кг/м³, соответственно. Значение массового расхода в поперечном сечении воздуховода в среднем составляет 4,61 м³/с (рис. 6).

Для сравнения были проведены исследования с использованием модификаций базовой модели, включающих задание нижней координаты свободного пространства Z равной -450 м и 0 м. Анализ влияния вариации данной характеристики модели, выявил следующую особенность – глубина заложения подземного сооружения существенно влияет на динамику газообмена и температурный режим при пожаре в ПИЛ.

Сценарии с $Z = -525$ м (базовая модель) и $Z = -450$ м, показали более высокие значения скорости движения и массового расхода газа в воздуховоде относительно сценария, где $Z = 0$ м. Температура газа в данных экспериментах характеризуется существенной неравномерностью как по высоте пространства, так и по его

длине – относительно очага пожара (рис. 7). На развитой стадии пожара температуры в припотолочном слое газа ниже, чем полученные при расположении исследуемого объема вблизи поверхности ($Z = 0$ м). Следует отметить, что различия температур при $Z = -525$ м и $Z = -450$ м незначительны [3].

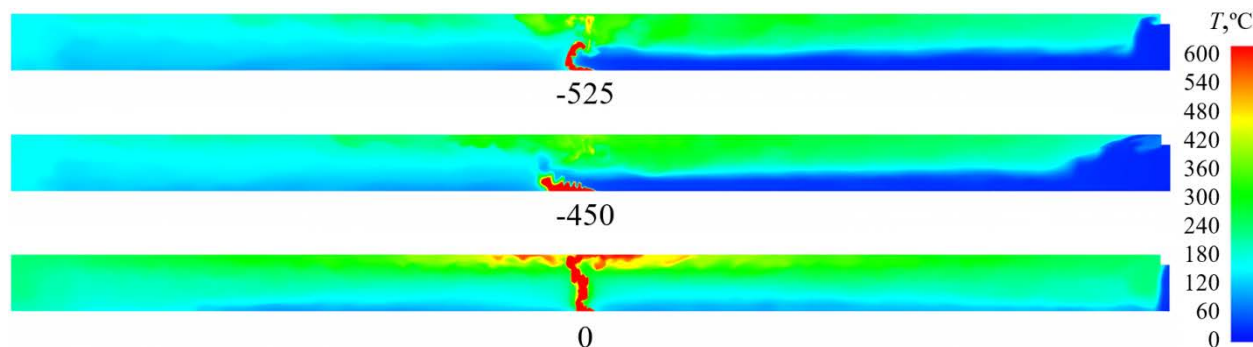


Рис. 7. Поля температуры газовой среды в плоскости $X = 0$ м при $Z = -525$ м, $Z = -450$ м, $Z = 0$ м в момент времени 300 с

Выводы и заключение

Таким образом, по результатам численного моделирования можно сделать вывод, что в подземных сооружениях глубокого заложения протекают уникальные процессы в газовой среде при пожаре, отличные от происходящих в зданиях на поверхности и являющихся широко исследованными.

Описанная базовая модель ПИЛ может быть модифицирована и использована для исследования влияния на динамику пожара в сооружении: размера ячеек сетки, теплофизических свойств поверхности, особенностей вентиляции, площади и пожароопасных свойств горючей нагрузки.

Список источников

1. Ишин А. В. Анализ проблем современных городов и возможностей их решения с использованием подземного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S6. С. 107–112. EDN LACGGT.
2. Чунюк Д. Ю., Сельвиан С. М. Подземные сооружения промышленного и гражданского назначения. М.: Изд-во МИСИ МГСУ, 2022. 44 с.
3. Пожаркова И. Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 4. С. 22–35.
4. Пожаркова И. Н. Технология оценки прогрева горной породы при пожаре в подземной исследовательской лаборатории // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 9. С. 71–83. EDN CZMEMY.
5. Материалы обоснования лицензии на сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т. 1 // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»: сайт. URL: https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf (дата обращения: 15.01.2025).
6. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 2: Verification / K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott [et al.] / National Institute of Standards and Technology, Technical Research Centre of Finland. NIST Special Publication 1018-2, 2013.

**Распознавание типовых действий пользователя при взаимодействии
с цифровым продуктом на основе анализа движения взгляда**

**Recognition of typical user actions when interacting with
a digital product based on gaze movement analysis**

Т. Ю. Посинковский, А. С. Голунова

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

T. Y. Posinkovskiy, A. S. Golunova

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. В статье описывается методика определения действий пользователя в графическом пользовательском интерфейсе. Рассматривается эффективность применения различных вариантов интерполяции и фильтрации полученных данных для решения задачи распознавания типовых действий пользователя. Проводится анализ принципов определения фиксаций и саккад с учетом переходных процессов, определяются подходы к выбору базовых признаков наличия паттернов в фиксации. По результатам серии экспериментов делается расчет основных параметров и паттерна типового действия «Чтение текста», анализируются эффективность и полученные результаты.

Ключевые слова: анализ движения глаз, графический пользовательский интерфейс, интерполяция, фильтрация данных

Abstract. The article describes a methodology for determining user actions in a graphical user interface. It examines the effectiveness of applying various interpolation and filtering techniques to the collected data for recognizing typical user actions. The analysis covers the principles of identifying fixations and saccades, taking into account transient processes, and defines approaches for selecting basic features that indicate the presence of patterns in fixations. Based on a series of experiments, the key parameters and patterns of the typical 'Text Reading' action are calculated, and the effectiveness and obtained results are analyzed.

Keywords: eye movement analysis, graphical user interface, interpolation, data filtering

Введение

В настоящее время графические пользовательские интерфейсы цифровых продуктов являются основным и самым популярным методом человеко-машинного взаимодействия. Дизайн-системы унификации таких интерфейсов (такие как, например, Material Design от Google или Apple Human Interface) делают взаимодействие пользователей с цифровым продуктом привычным и удобным, состоящим из относительно небольшого количества повторяющихся типовых действий. Определение и последующая классификация таких действий позволяют структурировать процесс взаимодействия, выявить и изучить возникающие при этом сложности, анализировать пользовательский опыт и проводить дальнейшую оптимизацию интерфейсов.

Одним из наиболее эффективных методов изучения такого взаимодействия является айтрекинг. Этот метод позволяет регистрировать движения глаз пользователя, фиксируя точки внимания, последовательность просмотра элементов интерфейса и длительность фиксаций. Преимущество айтрекинга заключается в его высокой точности и объективности: он позволяет получить данные о том, как пользователь визуально воспринимает интерфейс, не полагаясь на субъективные отчеты. Фиксации (периоды относительной неподвижности взгляда) и саккады (быстрые скачкообразные движения), являются ключевыми индикаторами визуального внимания и когнитивных процессов. Однако исходные данные, получаемые от устройств этого типа, часто содержат шум, выбросы и неравномерный шаг квантования, что затрудняет их непосредственное использование для анализа [1].

Целью статьи является разработка и подтверждение на практике основных элементов методики обработки и анализа данных движения глаз для возможности определения типовых действий пользователей в графическом интерфейсе с помощью математического и статистического анализа характеристик фиксаций и саккад.

Теория

Разделим типовые действия, выполняемые пользователями в графических интерфейсах, на составные части следующим образом:

– Поиск элемента интерфейса. Пользователи перемещаются между элементами интерфейса (меню, вкладки, кнопки) для поиска нужной информации или функций.

– Фокусировка на элементе. Пользователи выбирают объекты (чекбоксы, радиокнопки, элементы списка) для выполнения действий или настройки параметров.

– Ввод данных в элемент. Пользователи вводят информацию в текстовые поля, формы или другие элементы интерфейса.

– Принятие решения. Пользователь выбирает действие (например, нажать кнопку или выбрать пункт меню).

– Ожидание реакции системы. Пользователь ожидает ответа от системы (например, загрузки страницы или выполнения действия).

– Просмотр контента. Пользователи просматривают контент (текст, изображения, видео).

– Реакция на ошибку или уведомление. Пользователь сталкивается с ошибкой или получает уведомление.

Разрабатываемая методика должна иметь возможность анализируя данные движения глаз, достоверно классифицировать такие действия и определять их временные характеристики. Исходя из вышесказанного, выделим в ней следующие этапы:

1. Получение дискретных данных движения глаз пользователя.

2. Устранение неравномерности квантования.

3. Фильтрация исходного сигнала, удаление шумов.

4. Разделение исходных данных на периоды фиксаций и саккад.

5. Вычисление основных статистических характеристик саккад и фиксаций.

6. Достоверное определение по рассчитанным значениям принадлежности каждой фиксации к «паттернам» типовых действий пользователя.

7. Группировка близлежащих фиксаций, относящихся к одному «паттерну», в конечную, определение временных характеристик его начала и окончания.

Рассмотрим этапы более подробно.

Исходные («сырые») данные, полученные непосредственно из айтрекинговых систем, представляют собой временные ряды координат взгляда, последовательность измерений (t_i, x_i, y_i) , где t_i – временные отметки, а x_i и y_i – координаты взгляда в пространстве. Такие ряды обязательно содержат пропуски или неравномерные интервалы между измерениями, что связано с ограничениями аппаратуры, задержками в передаче данных или физиологическими особенностями, такими как моргание или временная потеря сигнала. Если шаг времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ непостоянен, это приводит к появлению неприемлемых ошибок при вычислении скорости и ускорения движения глаз, искажению статистических показателей. Интерполяция данных временных рядов является *критически важным* этапом предварительной обработки «сырых» данных [2]. В рамках проведения экспериментов для целей выбора лучшей был произведен расчет метрик точности трех основных видов интерполяции: линейной, кубической (РСНП) и сплайн-интерполяции.

Шум в исходных данных может быть вызван как микродвижениями глаз, так и аппаратными помехами. Фиксации характеризуются низкочастотными компонентами сигнала (обычно ниже 2 Гц). Саккады в своем составе имеют частотные компоненты до 20–30 Гц. Тремор глаз и аппаратные помехи – высокочастотные компоненты (выше 100 Гц и выше 30 Гц соответственно). Отсутствие фильтрации шума временных рядов координат взгляда может приводить к ложному обнаружению саккад вследствие формирования высокочастотным шумом ложных пиков скорости, которые будут ошибочно интерпретированы как саккады. Так же возможно и искажение фиксаций: шум вызывает колебания координат взгляда, что значительно понижает точность их идентификации, что особенно критично, так как фиксации являются ключевым элементом анализа определения «паттернов» типовых действий пользователя. В рамках проведения экспериментов по полученным данным был произведен расчет метрик точности трех методов фильтрации: скользящее среднее, медианный фильтр, низкочастотный фильтр.

Определение фиксаций и саккад в подготовленном дискретном сигнале возможно по анализу скорости движения глаз в каждой точке временного ряда [3]. Общую скорость движения глаз можно вычислить по формуле

$$\vartheta = \sqrt{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2}, \quad (1)$$

где для численного вычисления скоростей ϑ_x и ϑ_y по координатам x и y соответственно в дискретных временных рядах может быть использована разностная аппроксимация

$$\vartheta_x \approx \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i},$$

$$\vartheta_y \approx \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i},$$
(2)

где $x_{i+1} - x_i$, $y_{i+1} - y_i$ – разности между текущей и последующей координатой x и y соответственно, а $t_{i+1} - t_i$ – шаг времени, после проведения аппроксимации одинаковый для всех временных отсчетов.

Далее по данным вектора общей скорости, рассчитанного по формуле (1) для каждого временного отсчета становится возможно определить его принадлежность к саккаде:

$$\text{saccade_indices}_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \vartheta_i > \text{threshold} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

где threshold – порог отсечения по скорости, saccade_indices_i – элемент вектора временных отсчетов, принадлежащих саккадам. Если скорость взгляда превышает некий заранее установленный пороговый уровень threshold , то в этой точке определяется саккада. Так как саккады формируются и затухают постепенно [4], при группировке их необходимо расширить, добавив слева и справа саккады прилежащие временные отсчеты, скорость в которых меньше, чем threshold_saccade , но больше чем некое значение $\text{threshold_fixation}$. Таким образом саккады будут продлены на краях. Все временные отсчеты, после выполнения процедуры расширения не отнесенные к саккадам, *считаются фиксациями*. Последовательно идущие временные интервалы саккад и фиксаций группируются совместно и формируется их итоговый перечень.

Далее для каждой полученной фиксации вычисляются *базовые признаки паттернов (БПП)* – набор признаков и статистических характеристик фиксации, отражающих вероятности ее принадлежности к различным «паттернам» типовых действий пользователя. Эти признаки должны быть достаточно чувствительными, позволять достоверно характеризовать то или иное типовое действие пользователя и могут выражаться, например, через:

– Коэффициенты изменения, средние значения, максимальное/минимальное значение движения взгляда по осям в саккаде и фиксации.

– Величины скорости и направления движения взгляда по осям.

– Площади фиксаций, соотношение длины фиксации к ее высоте, статистические показатели.

– Взаимное расположение предыдущей и (или) последующей фиксации относительно текущей.

БПП выбираются в диапазоне от 0 до 1, где 0 – полное отсутствие вероятности вхождения фиксации в «паттерн» типовых действий пользователя по данному признаку, а 1 – 100% вероятность. По полученным значениям соответствующих для каждого «паттерна» БПП может быть рассчитана *итоговая функция вероятности (ИФВ)* вхождения фиксации в «паттерн»:

$$\text{ИФВ}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{БПП}_i)}{i}, \quad (4)$$

где ИФВ_{ij} – итоговая функция вероятности наличия i -го «паттерна» в j -й фиксации. Далее для всех ИФВ_{ij} становится возможным определить принадлежность фиксации к «паттерну» i по формуле:

$$\text{pattern_indexes}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{ИФВ}_{ij} > \text{pattern_threshold}_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где $\text{pattern_indexes}_{ij}$ – элемент вектора pattern_indexes_i , определяющего принадлежность j -й фиксации к i -му «паттерну», а $\text{pattern_threshold}_i$ – некая пороговая вероятность, при которой j -я фиксация считается принадлежащей i -му «паттерну». Так как ИФВ_i может нарастать и спадать постепенно, при группировке их так же необходимо расширить, добавив слева и справа фиксации, ИФВ_i которых меньше, чем $\text{pattern_threshold}_i$, но больше чем некое значение $\text{pattern_threshold_min}_i$. Таким образом «паттерн» будет расширен на краях.

Результаты экспериментов

Для практического подтверждения разрабатываемой методики и опытного определения оптимальных значений характеристик и параметров была проведена серия экспериментов.

Экспериментальная группа состояла из 10 испытуемых. Социальная группа – студенты, средний возраст 21 год ($SD = 0,63$). В экспериментальном окружении группа выполняла тестовое задание: поиск списка научных работ определенного автора на сайте <https://elibrary.ru/>, нахождение среди них заранее определенной работы, изучение ее аннотации, рассмотрение и понимание иллюстраций. В тестовом задании выполнялись следующие типовые действия пользователя в интерфейсе: поиск элементов интерфейса, ввод данных, ожидание реакции системы, просмотр текста и графических изображений.

Для получения данных положения взгляда использовался айтрекер Tobii Eye Tracker 5, подключенный к USB порту персонального компьютера. «Сырые» данные через проприетарную библиотеку Tobii Stream Engine последовательно записывались в текстовый файл в следующем порядке: метка времени (в мкс), координаты x и y взгляда (число от 0 до 1 с точностью шесть знаков после запятой). Частота дискретизации сигнала составила 67 Гц. Дальнейшая обработка полученных данных и математическое моделирование производилось в среде MatLab версии R2023a.

Для определения лучшего метода интерполяции по полученным данным был проведен расчет метрик точности интерполяции: среднеквадратичная ошибка (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R-squared), а также метрик сохранности структуры сигнала: коэффициент корреляции между исходными и интерполированными данными (PCC) и коэффициент сохранения энергии сигнала (Energy Preservation). Расчет производился для трех видов интерполяции: линейной, кубической и сплайн-интерполяции. Полученные результаты для координат x и y приведены в табл. 1

Таблица 1

Полученные значение метрик точности интерполяции

Метрики	Тип интерполяции координаты X			Тип интерполяции координаты Y		
	линейная	кубическая	Сплайн	линейная	кубическая	Сплайн
RMSE	3,836794	1,042373	3,498840	2,409435	0,575160	2,200225
MAE	0,584267	0,287248	0,699112	0,308854	0,117615	0,386759
R-squared	0,999919	0,999994	0,999934	0,999895	0,999994	0,999914
PCC	0,999960	0,999997	0,999967	0,999948	0,999997	0,999957
Energy Preservation	0,999632	0,999940	1,000010	0,999659	0,999948	0,999942

Из анализа табл. 1 следует, что все методы интерполяции могут быть использованы в дальнейших расчетах без значительного снижения достоверности, но кубическая интерполяция имеет минимальное значение среднеквадратичной, средней абсолютной ошибок для всех координат и коэффициент корреляции, и, следовательно, более предпочтительна для использования.

В результате анализа выбран метод кубической интерполяции, как обеспечивающий оптимальный баланс между точностью и сохранением плавности сигнала, что особенно важно для данных движения глаз, где необходимо сохранить монотонность и избежать осцилляций, которые могут быть вызваны сплайн-аппроксимацией.

Для определения лучшего метода фильтрации исследованы метрики качества трех методов фильтрации: скользящее среднее, медианный фильтр, фильтр низких частот (фильтр Баттерворта второго порядка с частотой среза 10 Гц). Размер окна фильтрации определен тремя временными отсчетами. Для дополнительной оценки сигнала к вышеуказанным метрикам использовалась дополнительная: отношение сигнал-шум (SNR). Полученные результаты расчета приведены в табл. 2.

Из анализа табл. 2 следует, что наименьшее значение среднеквадратичной и средней абсолютной ошибок обеспечивает использование медианного фильтра. Он так же имеет максимальный уровень сигнал-шум и максимально достоверно сохраняет энергию и форму полезного сигнала.

Таблица 2

Полученные значение метрик точности фильтрации

Метрики	Тип фильтрации координаты X			Тип фильтрации координаты X		
	Скользящее среднее	Медианный фильтр	Низкочастотный фильтр	Скользящее среднее	Медианный фильтр	Низкочастотный фильтр
RMSE	9,661737	3,920617	41,51543	6,73747	3,960514	24,77930
MAE	2,994565	0,405612	20,25602	1,656784	0,323237	9,866508
SNR	39,77054	48,43265	27,10611	39,09215	43,97890	27,76727
PCC	0,999689	0,999937	0,994302	0,999529	0,999839	0,993585
Energy Preservation	0,999112	0,999884	0,995096	0,999254	0,999982	0,996310

Исходя из вышесказанного, исходный вектор времени заменялся равномерными отсчетами времени, а вектора значений координат x и y интерполировались по новым отсчетам методом кубической интерполяции. Далее, к интерполированным данным применялся медианный фильтр с размером окна равным трем единицам, после чего по формуле (2) вычислялись вектора скоростей ϑ_x и ϑ_y , а по формуле (1) итоговый вектор ϑ – общая скорость перемещения взгляда в каждой точке временного ряда.

При расчете принадлежности временных отсчетов к саккадам по формуле (3) использовались следующие значения порогов отсечения по скорости: $\text{threshold_saccade} = 3.2$, $\text{threshold_fixation} = 0.5$. При понижении значения threshold_saccade ниже 3.2 фиксировались частые ложные определения саккад, а при увеличении параметра $\text{threshold_fixation}$ выше значения 0.5 в фиксации попадали крайние временные отсчеты саккад, что приводило к значительному увеличению величин дисперсии и стандартного отклонения фиксаций. На рис. 1 приведен пример распределение саккад и фиксаций на графике скоростей одного из экспериментов.

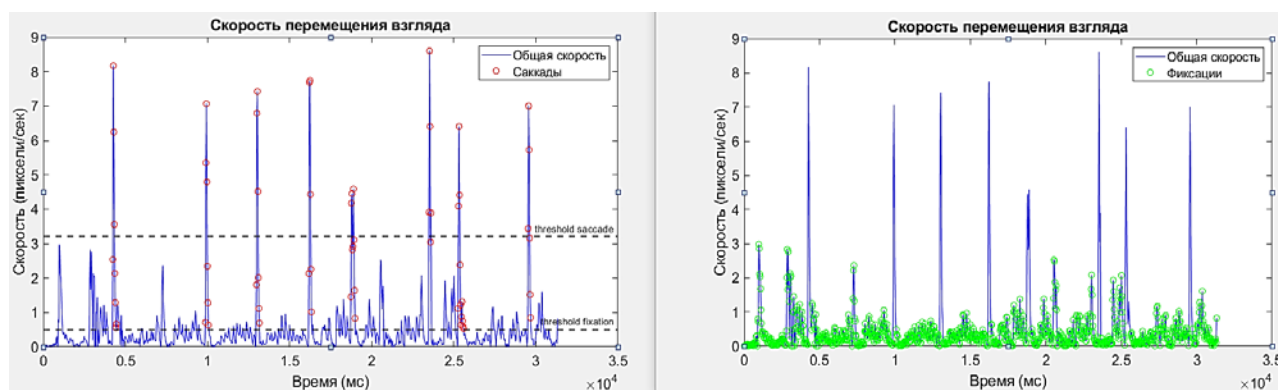


Рис. 1. Распределение саккад и фиксаций на графике скорости перемещения взгляда

После определения перечня фиксаций для каждой из них по формуле (4) вычислялись базовые признаки паттернов (БПП). Для примера рассмотрим определение и расчет БПП паттерна «Чтение текста работы». Из анализа графического изображения паттерна, представленного на рис. 2 следует, что он состоит из определенного количества фиксаций и саккад, идущих друг за другом и обладающих следующими свойствами:

1. Общий характер движения глаз: по оси x – плавное равномерное движения слева направо, по оси y – нахождения взгляда на одной координате с минимальным разбросом во время фиксации, общий вид графика – плавное, без сильных ускорений снижение координат снизу-вверх.
2. Саккады: резкие, с большим ускорением по оси x , практически без ускорения по оси y , идущие последовательно справа налево, похожих продолжительностей и с похожими координатами начала и окончания.
3. Фиксации: по оси x длинные, с небольшим ускорением по оси x и еще меньшим по оси y .

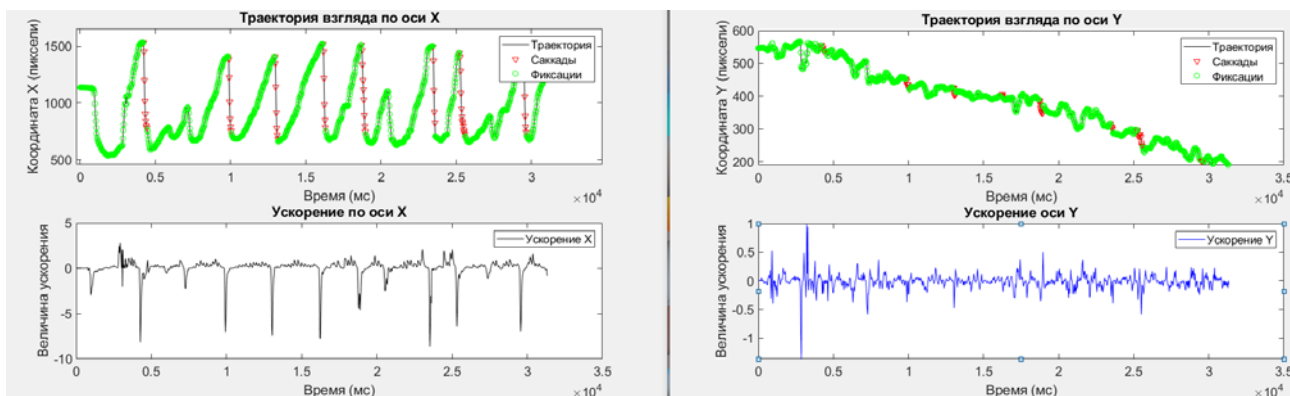


Рис. 2. Графическое представление траектории взгляда и ускорения по оси X и Y в паттерне «Чтение текста работы»

Исходя из вышесказанного были выбраны шесть инвариантных базовых признаков паттерна «Чтение текста работы», устойчивых как к пропорциональному, так и к непропорциональному масштабированию и определен алгоритм формирования их значений (табл. 3).

Таблица 3

Способы расчета БПП паттерна «чтения текста»

Наименование БПП	Диапазон для присвоения значения 1	Диапазон для присвоения значения 0.5
Угол наклона фиксации к оси X в градусах	От -8 до 8	От -12 до -8 или от 8 до 12
Соотношение стандартных отклонений фиксации по осям X и Y (относительная «длина» фиксации)	Более 10	От 4 до 10
Угол наклона саккады, ведущей от окончания текущей фиксации к началу следующей	От -7 до 7	От -12 до -7 или от 7 до 12
Разница координат Y начала текущей и следующей фиксации	От -100 до 100	От -300 до 100 или от 100 до 300
Разница координат X начала текущей и следующей фиксации	От -150 до 150	От -350 до 150 или от 150 до 350
Продолжительность фиксаций, сек.	Более 3	От 1.5 до 3

После расчета согласно формуле (4) для каждой саккады перечня БПП по формуле (5) был определен факт принадлежности каждой саккады к паттерну (рис. 3). При этом использовались пороговое значение `pattern_threshold` равное 0.85, и `pattern_threshold_min` равное 0.5.

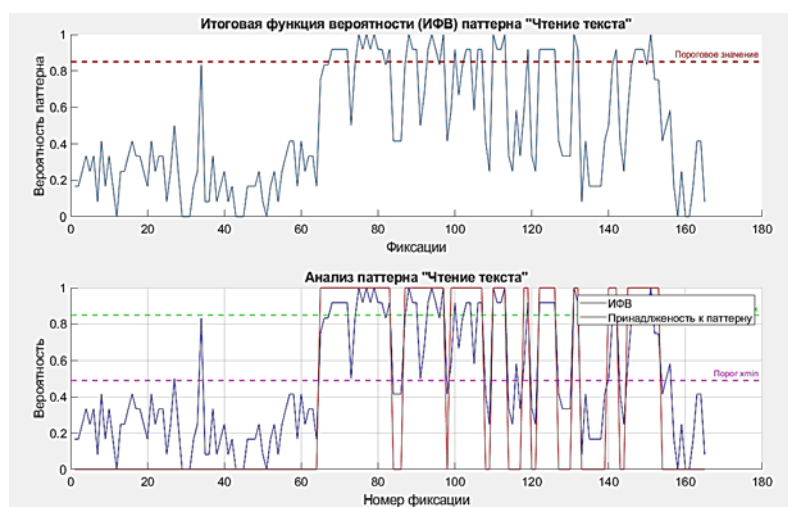


Рис. 3. График определения ИФВ паттерна «Чтение текста» для одного из экспериментов

В результате в серии из 10 экспериментов при использовании методики с описанными выше параметрами удалось определить 92 паттерна «Чтения текста» из 98, выявленных вручную при анализе видеозаписей, что соответствует уровню доверия 93,8% и входит в уровень значимости $\alpha = 0.1$, что является приемлемым результатом.

Выводы и заключение

Разработанная методика позволяет эффективно разделять дискретные данные движения взгляда на фиксации и саккады, рассчитывать для каждой из них статистические, временные и спектральные характеристики, оценивать состав и продолжительность типовых действий, выполняемых пользователем в интерфейсе цифрового продукта. В то же время после проведения серии экспериментов становится очевидно, что для полного понимания причин выбора пользователем того или иного действия, их мотивации при взаимодействии с элементами интерфейса данных только движения глаза становится недостаточно. Процесс анализа необходимо дополнять дополнительными данными, такими, например, как положения мыши, клавиши, нажимаемые пользователем в процессе взаимодействия, информацией о возможных сценариях использования цифрового продукта. Типовые действия необходимо группировать по неким признакам в укрупненные группы. Выход может быть найден в использовании механизмов кластеризации, таких, например, как DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise, плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума) [5], адаптированных к использованию временных рядов, применяемых или к фиксациям, или непосредственно к данным движения взгляда.

Особое внимание необходимо уделить добавлению в методику информации с датчиков биосигналов человека, таких как ВСР и ЭЭГ, анализ которых позволит получить данные об уровнях стресса, увеличении или уменьшении когнитивной нагрузки, что позволит перейти непосредственно к процессу анализа удобства интерфейса, качества его воспринимаемости пользователями.

Разработанная методика в дальнейшем может быть использована в различных прикладных задачах, таких как исследование пользовательского опыта, особенности взаимодействия с интерфейсом пользователей с различными типами расстройств нервной системы и изучение когнитивных процессов.

Список источников

1. Duchowski A. Eye Tracking Methodology: Theory and Practice. Springer, 2007. 218 p.
2. Chatfield C. The Analysis of Time Series: An Introduction. New York : Chapman and Hall/CRC, 2003. 352 p.
3. Eye Tracking: A Comprehensive Guide to Methods and Measures / K. Holmqvist, M. Nyström, R. Andersson [et al.]. Oxford University Press, 2011. 543 p.
4. Nyström M., Holmqvist K. An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eyetracking data // Behavior Research Methods. 2010. Vol. 42, no. 1. P. 188–204.
5. Митин Г. В., Панов А. В. Модификация алгоритма dbscan с использованием гибридных подходов к определению границ кластеров для обработки потоковых данных // Электронный научный журнал «ИТ-Стандарт». 2023. № 4. P. 36–57.

УДК 621.225.2

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-78-83

**Имитационная модель ходовой части аксиально-поршневой гидромашины
с наклонным диском в среде Matlab Simulink**

**Simulation model of the undercarriage of an axial-piston hydraulic
swash plate machine in the Matlab Simulink environment**

С. М. Стажков, В. С. Ельчинский, Тунг Лам Фам

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

S. M. Stazhkov, V. S. Elchinsky, Tung Lam Pham

*Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, St. Petersburg,
Russian Federation*

Аннотация. В машиностроении моделирование и симуляция применяются с целью значительного сокращения времени проектирования. Matlab Simulink – надежный инструмент для расчета и симуляции физических процессов, дающий результаты, приближенные к реальности. При симуляции работы аксиально-поршневого гидромотора с наклонным диском (АПГНД) с помощью Matlab Simulink можно получить его основные характеристики при различных вариантах конструкции поршневых механизмов.

Ключевые слова: объемный гидропривод, аксиально-поршневой гидромотор с наклонным диском, ходовая часть, Matlab Simulink, Simscape Multibody, технические характеристики, моделирование

Abstract. In mechanical engineering, modeling and simulation are used to significantly reduce design time. Matlab Simulink is a reliable tool for calculating and simulating physical processes, giving results close to reality. When simulating an axial-piston hydraulic swash plate motor (APGND) using Matlab Simulink, it is possible to obtain its main characteristics for various design variants of piston mechanisms.

Keywords: volumetric hydraulic drive, axial-piston hydraulic swash plate motor, undercarriage, Matlab Simulink, Simscape Multibody, technical characteristics, modeling

Введение

С целью усовершенствования характеристик аксиально-поршневого гидромотора с наклонным диском (АПГНД) изменение одного или нескольких конструктивных параметров элементов ходовой части гидромашины помимо расчетных результатов может привести к неочевидным изменениям, что может как увеличить эффективность работы гидромашины, так и снизить [1]. На основе механического и кинематического анализа элементов ходовой части гидромашины можно получить математические модели, которые подробно описывают работу элементов. Matlab Simulink позволяет симулировать кинематику и гидромеханические процессы, протекающие в процессе работы гидромашины.

В результате исследований по конструктивной модернизации АПГНД с целью повышения ее характеристик на кафедре «Системы приводов, мехатроника и робототехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова был получен патент RU2801446C1 на модифицированную конструкцию поршневого механизма [2]. В работе Кузьмина А.О. показано, что модифицированная конструкция поршневого механизма за счет смещения шарнирной головки поршня позволяет существенно снизить силы трения в поршневой паре [3]. Однако, исследование различных вариантов модифицированной конструкции и типоразмеров поршневых механизмах в лабораторных условиях требует значительных затрат.

Основные характеристики гидромотора с различными вариантами конструкции поршневой пары можно получить с помощью Matlab Simulink.

В Simulink в основном используются пакеты инструментов из библиотеки Simscape, включая пакеты Simscape Fluid и Simscape Multibody [4, 5]. Задачи настройки симулирования включают в себя: создание 3D-блоков компонентов с использованием библиотеки Multibody (основные компоненты, участвующие в работе ходовой части), соединение компонентов с использованием механических узлов, создание блоков симулирования гидромеханических процессов с использованием библиотеки Fluid и, наконец, связывание

компонентов между собой таким образом, чтобы имитационная модель могла работать аналогично реальному гидромотору.

Задавая различные параметры компонентов, такие как конструктивные параметры (типоразмер поршневых механизмов, величина смещения шарнирной головки поршня и т.п.) и параметры регулирования (угол наклона опорного диска, расход жидкости, нагрузка на валу), можно получить соответствующие результаты симулирования и провести сравнительный анализ.

Для симулирования процессов реализуемых в ходовой части АПГНД примем следующие условия:

«1» поток жидкости с расходом Q подается в поршневые механизмы, совершающие возвратно-поступательное движение;

«2» кинематика ходовой части основана на преобразовании возвратно-поступательного движения поршня в вращательное движение вала гидромашины;

«3» поршневые механизмы симметрично установлены в блоке цилиндров, а также попеременная работа поршней в зоне всасывания и нагнетания обеспечивается за счет 3/2 распределителя, имитирующего работу распределительного узла реальной гидромашины;

«4» учитываются факторы, которые влияют на рабочий процесс, такие как трение в кинематических парах и объемные потери в паре поршень-цилиндр [6, 7].

Имитационная модель ходовой части АПГНД

На рис. 1, а представлена упрощенная трехмерная модель ходовой части АПГНД с девятью поршневыми механизмами модифицированной конструкции. 2D-чертеж ходовой части представлен на рис. 1, б.

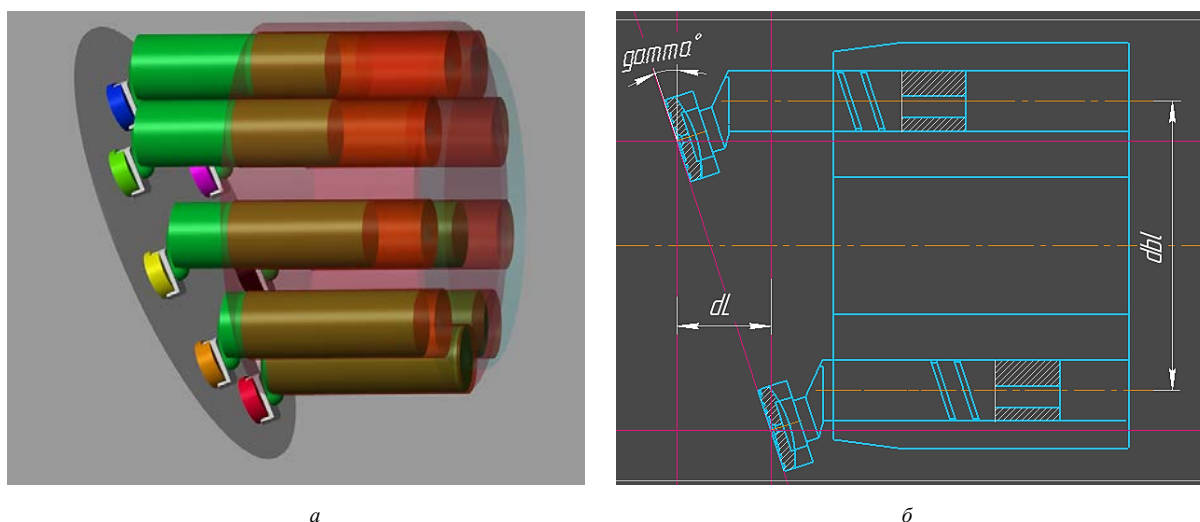


Рис. 1. а – 3 D модель АПГНД; б – 2D чертеж ходовой части АПГНД

Формула для определения скорости вращения вала гидромотора:

$$v_d = \frac{Q_n \cdot v_n \cdot K_H}{n \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dL}, \quad (1)$$

где Q_n – расход насоса за один оборот;

v_n – скорость вращения вала насоса;

K_H – общий КПД (механической и гидравлической) с учетом потерь;

n – количество поршней гидромотора;

r – радиус поршня;

$dL = db \cdot \tan(\gamma)$ – смещение поршня;

γ – угол наклона наклонного диска;

db – диаметр окружности, проведенной через оси поршней.

Для проверки работы имитационной модели были получены характеристики гидромотора при работе на холостом ходу. На рис. 5 представлен график давления и скорости вращения вала гидромотора, полученные при $\gamma = 22^\circ$, с расходом жидкости насоса, достигающим 5,34 л/мин и 2,67 л/мин, при КПД 95%.

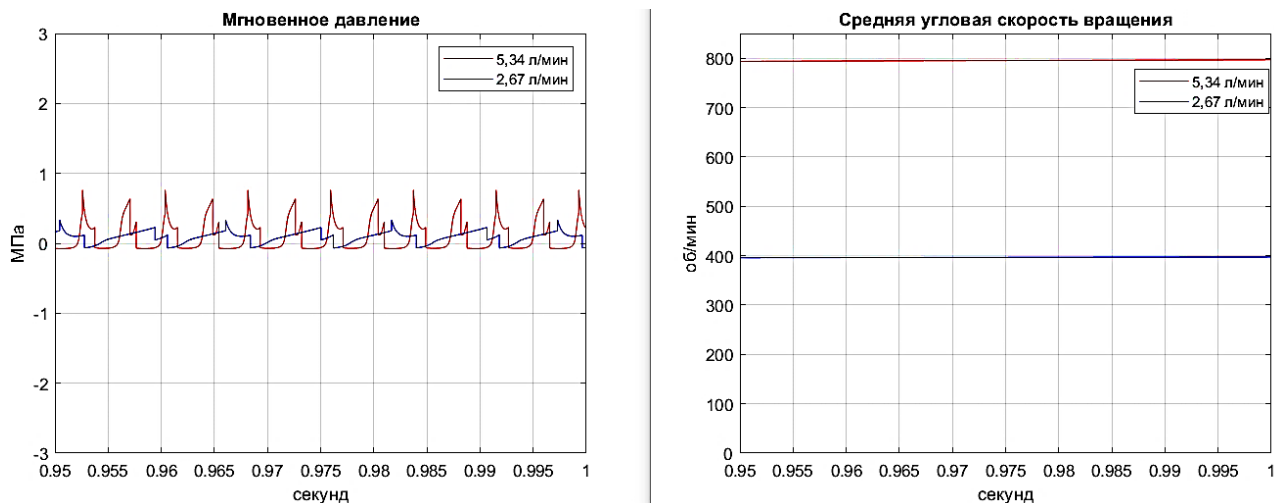


Рис. 5. Давление и угловая скорость вала при работе на холостом ходу

Из графиков можно сделать вывод, что скорость вращения вала гидромотора пропорциональна расходу жидкости, при этом среднее рабочее давление жидкости не превышает 1 МПа, так как в качестве нагрузки выступают только силы трения в кинематических парах.

При работе под нагрузкой рабочее давление жидкости увеличивается пропорционально увеличению нагрузки. Уравнение квазиравновесия системы сил в ходовой части гидромотора:

$$L_n + \sum P_n(t) = \sum (P_0(t) + P_t) \cdot S_n \cdot \tan \gamma \cdot k_\alpha, \quad (2)$$

где L_n – нагрузка;

$\sum P_n(t)$ – мгновенная сумма трения и внутреннего потребления;

$P_0(t)$ – мгновенное требуемое давление для нагрузки L_n ;

P_t – мгновенное требуемое давление для работы на холостом ходу;

$S_n = \pi \cdot r_n^2$ – поперечное сечение поршня;

γ – угол наклона наклонного диска;

$k_\alpha = \sin \alpha_{(t,i)}$ если $\alpha < 90^\circ$ или $k_\alpha = \sin(180^\circ - \alpha_{(t,i)})$ если $\alpha > 90^\circ$;

$\alpha_{(t,i)}$ – мгновенное положение угла поворота α ($0^\circ < \alpha < 360^\circ$) в соответствующий момент времени (по главной оси вращения гидромотора) поршня номер n (если этот поршень находится в области нагнетания распределителя).

Для проверки работы имитационной модели была установлена нагрузка на вал гидромотора, равная 400 Нм. Результат симуляции показан на рис. 6. Расход жидкости составляет 5,34 л/мин и 2,67 л/мин.

Результаты показывают, что при работе имитационной модели рабочее давление жидкости зависит только от нагрузки, а скорость вращения вала – только от расхода жидкости. Такие зависимости полностью соответствуют работе реальной гидромашины.

Для АПГНД одной из важнейших характеристик является минимальный расход жидкости, необходимый для страгивания вала под нагрузкой. Вал гидромотора можно считать стронувшимся, если его скорость вращения достигает 0,1 рад/с, что соответствует значению 1 об/мин.

В результате моделирования при $\gamma = 22^\circ$ был определен расход жидкости, необходимый для страгивания гидромотора, равный 2,162 л/мин. Для $\gamma = 18^\circ$ был получен результат – 2,453 л/мин. На рис. 7 представлен график зависимости скорости вращения вала гидромотора от расхода жидкости при угле наклона диска 18° и 22° соответственно.

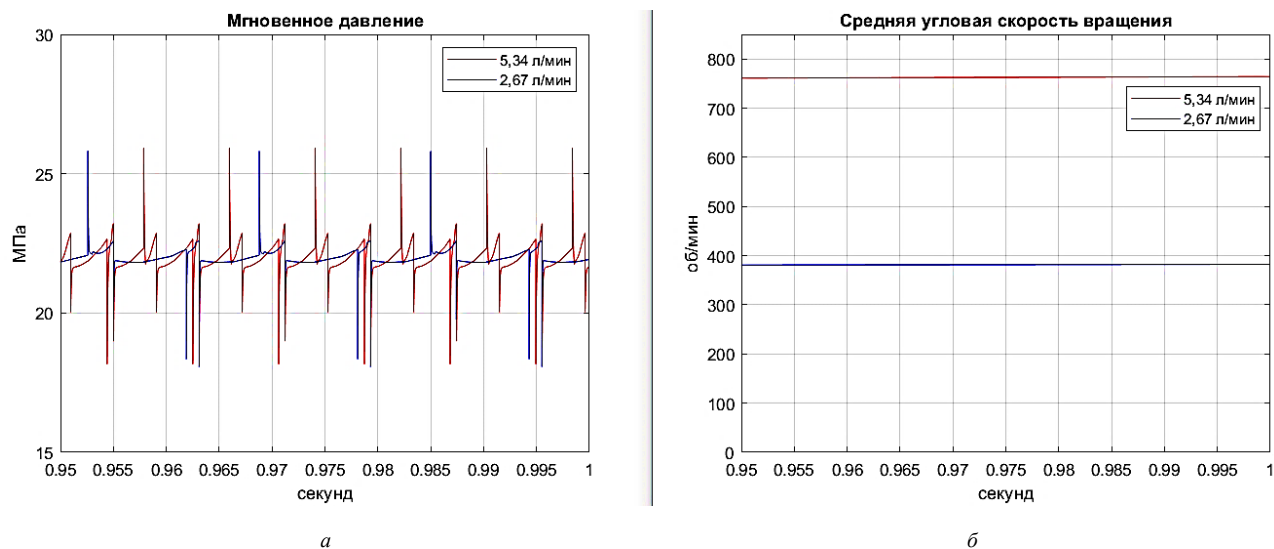


Рис. 6. Результат симуляции при работе под нагрузкой 400 Нм

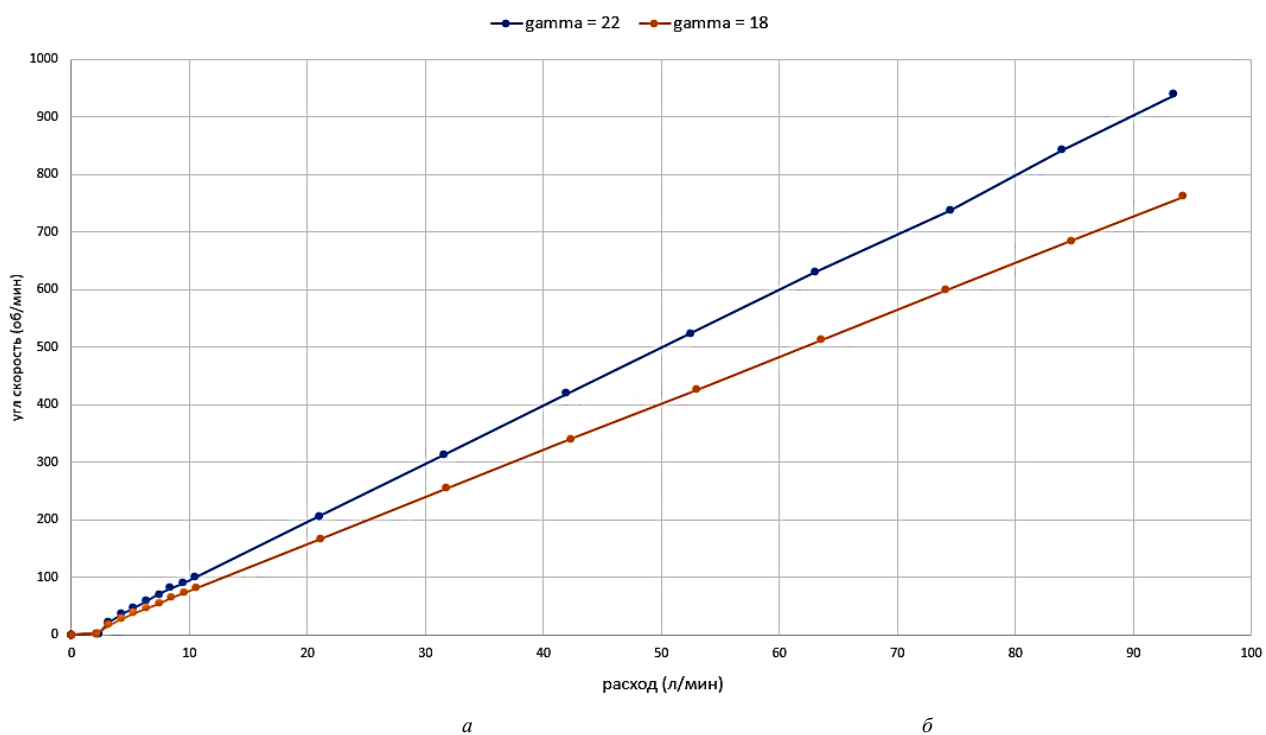


Рис. 7. Зависимости скорости вращения вала гидромотора от расхода жидкости при угле наклона 18° и 22°

Выводы и заключение

С использованием среды Matlab Simulink разработана имитационная модель работы аксиально-поршневого гидромотора с наклонным диском. Данная имитационная модель позволяет проводить исследования и оценивать влияние различных параметров на работу гидромотора.

Из результатов симуляции можно сделать вывод, что при одном и том же расходе, с увеличением угла наклона опорного диска растет скорость вращения вала гидромотора, что говорит о повышении гидромеханического КПД.

В ходе будущих исследований планируется усовершенствовать имитационную модель, добавив недостающие объемные потери в парах поршень-башмак и башмак-опорный диск.

Список источников

1. Аксиально-поршневые гидромашины. URL: <https://portal.sibadi.org/mod/page/view.php?id=46354>
2. RU2801446C1 – Патент РФ – С. М. Стажков, В. С. Ельчинский, А. О. Кузьмин – БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия.
3. Кузьмин, А. О. Улучшение характеристик регулируемых аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском : специальность 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузьмин Антон Олегович, 2022. 135 с. EDN DKPGCF.
4. Simscape Fluids: Введение и общие инструкции по применению. URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape-fluids.html>
5. Simscape Fluids: Введение и общие инструкции по применению. URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape-fluids.html>
6. Elchinsky, V.& Kuzmin, A.& Popov, V. & Stazhkov, S. (2020). Influence of the Design Parameters of the Piston Mechanism on the Dead Band of the Axial-Piston Hydraulic Machine. 10.2507/31st.daaam.proceedings.053.
7. Stazhkov, S., Korobova, I., Korolev, V., & Kuzmin, A. (2019). Hydrodynamic Processes Research of the Positive Displacement Hydraulic Machines Piston Interface, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0580-0585, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.078

УДК 551.51.81

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-84-89

**Применение характеристической функции случайного процесса
к анализу вспышки опасных конвективных явлений**

**Application of the characteristic function of a stochastic process
to the analysis of severe weather outbreak**

Я. А. Сурков, А. Б. Ионов, Г. В. Никонова

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

Ya. A. Surkov, A. B. Ionov, G. V. Nikonova

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. В данной работе рассматривается исследование характеристической функции случайного процесса и ее плотности вероятности, построенным по радиолокационной отражаемости наиболее характерных погодных аномалий, применительно к случаям крупного града и смерчей. Приведен анализ исследуемой области погодных явлений и существующих систем метеонаблюдений оперативного мониторинга и диагностики опасных конвективных явлений, которые относятся к разряду случайных процессов. Данные получены с использованием доплеровских метеорологических радиолокаторов. Анализируется смерч 9 июня 1984 года в Центральном Федеральном Округе России, а также суперячейковые грозы, породившие торнадо пятой категории восточнее Иваново и крупный град весом до одного килограмма в Ярославской области.

Ключевые слова: характеристическая функция, случайный процесс, плотность вероятности, суперячейка, крупный град, смерч

Abstract. This paper examines the study of the characteristic function of a random process and its probability density, constructed using radar reflectivity of the most typical weather anomalies, as applied to cases of large hail and tornadoes. The study area of weather phenomena and existing meteorological observation systems for operational monitoring and diagnostics of dangerous convective phenomena, which are classified as random processes, are analyzed. The data were obtained using Doppler meteorological radars. The tornado of June 9, 1984 in the Central Federal District of Russia is analyzed, as well as supercell thunderstorms that generated a category 5 tornado east of Ivanovo and large hail weighing up to one kilogram in the Yaroslavl Region.

Keywords: characteristic function, stochastic process, probability density, supercell, large hail, tornado

Введение

На сегодняшний день гидрометеорологической службе Российской Федерации необходимы системы метеорологического мониторинга, таких, как профилометры, грозопеленгаторы и радиолокаторы. Для оперативного мониторинга опасных конвективных штормов, генерирующих крупный град, шквалы и торнадо, необходимо обеспечивать устойчивое покрытие вышеперечисленными системами в связи с быстрыми и резко изменяющимися характеристиками метеоявлений. Особенности точного и оперативного прогнозирования опасных явлений погоды, в том числе конвективного характера основаны на математических методах анализа, в том числе вероятностных. Данные метеонаблюдений относятся к разряду случайных процессов, поэтому для задачи прогнозирования и анализа используются моделирование процессов, где применяются классическая статистическая теория принятия решений, метод дерева решений, нечеткая логика и другие вероятностные методы обработки информации [1–3].

Предлагается рассмотреть пример анализа с помощью характеристической функции и графика плотности вероятности, построенным по радиолокационной отражаемости наиболее характерных погодных аномалий. В качестве объекта исследования взяты: вспышка опасных конвективных явлений в ЦФО 9 июня 1984 года, которая является самой разрушительной за всю историю метеонаблюдений в России и одной из самых мощных в Европе. Как минимум восемь сильных смерчей пронесли по территории округа в тот день. Имеется информация о 74 погибших по данным Европейской Базы Сильных Штормов (ESWD), однако с большей долей вероятности жертв было намного больше. По данным американских исследователей Джонатана Финча и Дэна Бикоса торнадо пятой категории по шкале Фудзиты, прошедший восточнее Иваново, унес жизни как минимум 400 человек, более 1500 получили травмы различной степени тяжести. Кроме того, в соседней Ярославской области, в Тутаевском и Даниловском районах наблюдался крупный град, превышавший в диаметре 15 сантиметров [4].

Теория

Отражательная способность метеорологических целей. Для оперативного мониторинга и диагностики опасных конвективных явлений используются доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ). Одним из базовых продуктов ДМРЛ является радиолокационная отражаемость, что представляет собой меру эффективной площади рассеяния цели, которая может быть обнаружена радиолокатором и сравнима с эффективной площадью обратного рассеяния. Это мощность, отражаемая гидрометеорами (дождь, снег, крупа, град). Коэффициент отражения определяется как общая площадь отражения гидрометеора на кубический метр при диэлектрической проницаемости, превышающей ноль. Это значение пропорционально шестой степени диаметра сферического объекта. Поскольку гидрометеоры имеют разный диаметр, умножить это значение на их количество невозможно. Следовательно, коэффициент отражения представляет собой сумму всех отдельных объектов в пространстве размером в один кубический метр с учетом их диаметров:

$$Z = \int_0^{D_{max}} N_0 * e^{-\Lambda D} * D^6 dD$$

Здесь N_0 – количество гидрометеоров в единице объема, D – диаметр гидрометеора, Λ – показатель экспоненциальной функции.

Все типы метеорологических и неметеорологических целей обеспечивают определенный уровень отражательной способности. Количество осадков чаще всего измеряется с помощью соотношения между коэффициентом отражения Z и интенсивностью осадков R .

Коэффициент отражательной способности зависит от размера и количества гидрометеоров в объеме пространства и имеет единицы измерения.

- Обложные осадки: $Z = 200 * R^{1,6}$;
- Осадки, вызванные орографией: $Z = 31 * R^{1,71}$;
- Конвективные осадки: $Z = 286 * R^{1,37}$;
- Снег: $Z = 2000 * R^{1,2}$;

При отсутствии дополнительной информации о гидрометеорах общепринятым является использование значения по умолчанию. Обычно указывается в логарифмической шкале dbZ .

Таким образом, типичная шкала соотношения радиолокационной отражаемости и метеоявлений выглядит следующим образом:

- Ливневые осадки: 25–30 dbZ ,
- Град: 45–60+ dbZ ,
- Шквал: 45–50+ dbZ ,
- Торнадо: 20–70 dbZ , в зависимости от зоны прохождения и насыщенностью вихря обломками.

Методы анализа по данным мониторинга опасных конвективных явлений

Характеристическая функция случайного процесса. Случайные процессы наряду с общепринятыми функциями распределения можно характеризовать некоторыми вспомогательными функциями, которые однозначно связаны с функциями распределения, отражают и описывают все свойства случайного процесса. К таким функциям относится характеристическая функция (х.ф.), предложенная и использованная А.М. Ляпуновым для доказательства теоремы о пределе вероятности [5]. Одномерной характеристической функцией называют статистическое среднее экспоненты с мнимым показателем вида $jV_m \xi(t)$, в котором случайный процесс $\xi(t)$ умножается на произвольный вещественный параметр V_m , являющийся с физической точки зрения коэффициентом усиления (ослабления) мгновенных значений случайного процесса, а произведение $V_m \xi(t)$ есть мгновенная фаза аналитического сигнала [6]. Сам случайный процесс определяет только лишь закон изменения мгновенной фазы сигнала [7]. Математическая модель характеристической функции представляется следующим выражением:

$$\theta_1 V_m = m_1 \{ \exp[jV_m \xi(t)] \},$$

где $\theta_1(V_m)$ – одномерная характеристическая функция, $m_1\{\cdot\}$ – математический знак статистического среднего, $(V_m) = m\Delta V$ – параметр характеристической функции, ΔV – шаг дискретизации параметра функции. С помощью формулы Эйлера можно записать следующее:

$$\theta_1(V_m) = m_1 \{ \cos[V_m \xi(t)] + j \sin[V_m \xi(t)] \} = A(V_m) + jB(V_m),$$

где $A(V_m) = m_1 \{ \cos[V_m \xi(t)] \}$, что является действительной частью характеристической функции, $B(V_m) = m_1 \{ \sin[V_m \xi(t)] \}$, что является мнимой частью характеристической функции. В таком случае имеет место равенство

$$\theta_1(V_m) = |\theta_1(V_m)| \exp[j\gamma(V_m)].$$

Геометрически характеристическая функция может быть интерпретирована посредством пространственной фигуры, образованной вращением радиус-вектора длиной, равной $|\theta_1(V_m)|$, вокруг оси, на которой откладываются значения V_m . При этом проекции точки, принадлежащей получившейся фигуре, на оси координат равны действительной и мнимой частям х.ф. соответственно [8]. Параметры фигуры определяет непосредственно случайный процесс $\xi(t)$. Фигура на рисунке построена для классического гауссового процесса и похожа на воронку.

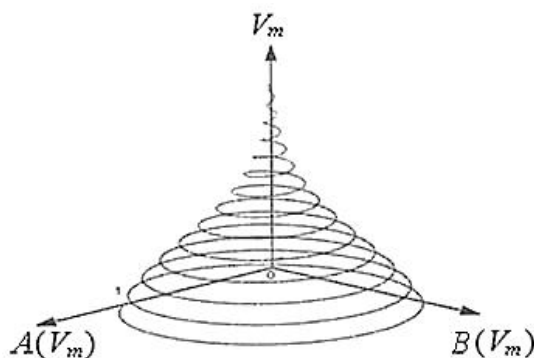


Рис. 1. Одна из возможных интерпретаций характеристической функции

Известная связь характеристической функции с вероятностными характеристиками случайного процесса представлена следующей формулой:

$$\theta_1(V_m) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_1(x) e^{jV_m x} dx,$$

где $W_1(x)$ – одномерная плотность вероятности случайного процесса $\xi(t)$.

Экспериментальные исследования

Рассмотрим хронологию вспышки конвективных явлений 9 июня 1984 года. Днем ранее центр западного циклона располагался над центральной частью Европы. В его южной части сформировалась вторичная волновая ложбина, быстро смещавшаяся в северо-восточном направлении. Утром 8 июня над Балканским полуостровом располагался оформленный вторичный циклон с выраженной фронтальной системой. В теплом секторе молодого циклона усиливалась адвекция тепла и наблюдался рост конвективной неустойчивости [9]. При прохождении циклона через территории восточной Румынии, Молдовы и Украины давление в центре продолжало падать, наблюдался рост барического градиента. В то же время в Молдове и Одесской области при прохождении суперячейковых гроз имело место выпадение крупного града до 6–8 сантиметров в диаметре и мощные конвективные шквалы со скоростью до 35–40 м/с. В 00 UTC 9 июня материнский циклон располагался над территорией западной России. Ровно через 6 часов произошло слияние барических образований в общий центр

низкого давления. Циклон продолжил движение в северо-восточном направлении. Сильное струйное течение обеспечивало заток теплого сухого воздуха в средних слоях атмосферы. Днем 9 июня зафиксировано формирование восьми суперячейковых гроз на территории от Тверской до востока Костромской области. Четвертая суперячейка оказалась наиболее долгоживущей из всех и сформировала торнадо 5 категории восточнее Иваново. Прохождение вихря сопровождалось градом до 3 см. В общей сложности смерч преодолел расстояние более чем в 100 км и завершил свой путь в лесах Костромской области [10].



Рис. 2. Торнадо EF-5 направляется в сторону турбазы Лунево, Костромская область. 9.06.1984

По данным, полученным с метеорологических радиолокаторов, построим характеристическую функцию и график плотности вероятности.

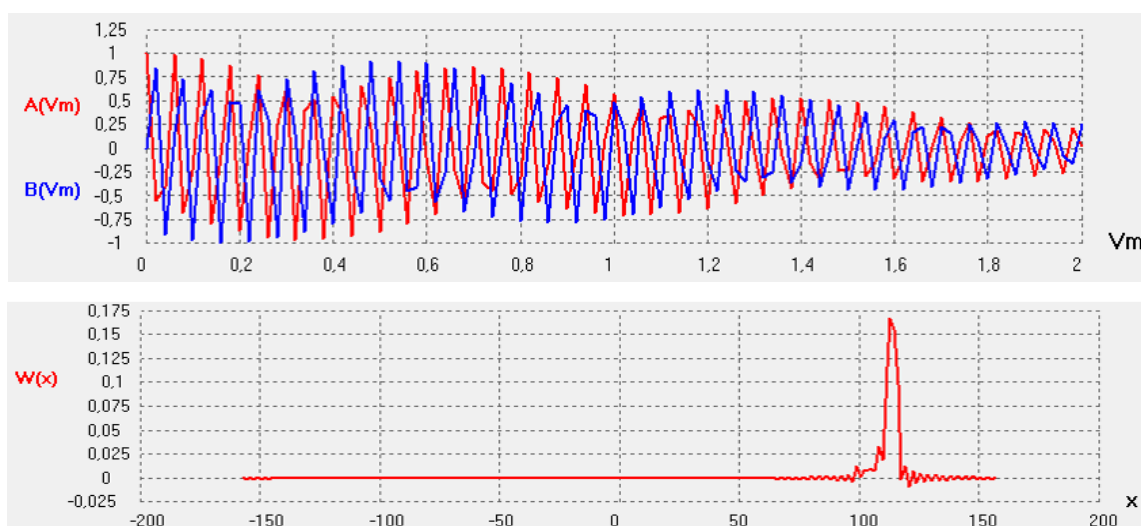


Рис. 3. Характеристическая функция и график плотности вероятности для ивановского смерча

Как можно видеть, на графике плотности вероятности имеется три выраженных пика. Наиболее выраженный из них сигнализирует о высоких значениях отражательной способности. Вторичные пики могут свидетельствовать как о мощных восходящих потоках в суперячейковом облаке, так и о скачкообразном поведении

вихря. По сообщениям очевидцев, торнадо то опускался на землю, то поднимался и имел несколько воронок (multivortex tornado).

Второй по мощности является суперячейка, прошедшая через Ярославскую область. Она породила два торнадо. Первый возник юго-западнее Ростова и оставил после себя масштабный ветровал в 30 км севернее города. Второй был оценен как EF-3 и полностью разрушил деревню Малое Сартово. Эта же суперячейка сгенерировала крупный град весом до 1 кг в Тутаевском и Даниловском районах[11].

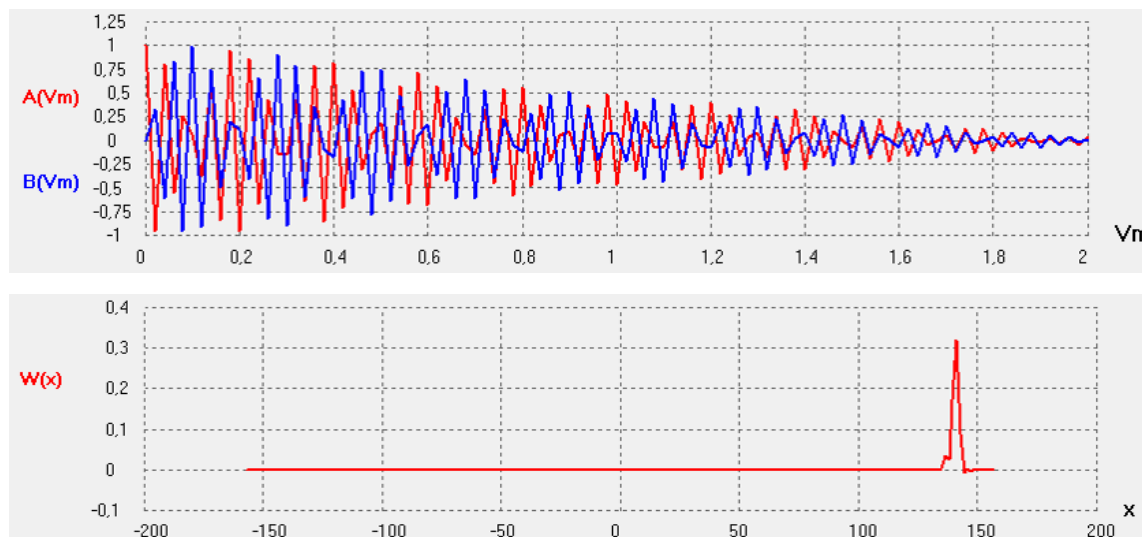


Рис. 4. Характеристическая функция и график плотности вероятности для случая крупного града

Как видно из графика плотности вероятности, имеет место взаимное искажение склонов и наличие двух выраженных пиков, что может говорить о широкой области высокой отражательной способности и локальных зонах экстремальных значений данного параметра (50 dBZ signature).

Заключение

В данной работе представлен анализ двух наиболее мощных суперячейковых гроз с помощью характеристической функции случайного процесса. Была оценена плотность вероятности для обоих случаев по радиолокационной отражаемости. В целом, было успешно воспроизведено событие вспышки конвективных явлений. В дальнейшем планируется проведение расширенного исследования с учетом влияния параметров опасной конвекции и добавления продуктов ДМРЛ, включая доплеровскую скорость, дифференциальную фазу и коэффициент корреляции.

Список источников

1. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part I. Theoretical Simulations Using Spectral Microphysical Modeling / A. V. Ryzhkov, M. R. Kumjian, S. M. Ganson, A. P. Khain // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2013. Vol. 52, no. 12. P. 2849–2870.
2. Ortega K. L., Krause J. M., Ryzhkov A. V. Polarimetric Radar Characteristics of Melting Hail. Part III. Validation of the Algorithm for Hail Size Discrimination // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2016. Vol. 55, no. 4. P. 829–848.
3. Сурков Я. А., Лутченко С. С. Определение характеристик опасных метеорологических явлений с помощью алгоритмов нечеткой логики по данным доплеровских метеорологических радиолокаторов // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. ст. LXIX Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 15 марта 2024 г.). Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2024. С. 26–30.
4. Finch J., Bikos, D. Russian tornado outbreak of 9 June 1984 // E-journal of Severe Storms Meteorology. 2012. Vol. 7, no. 4. P. 1–28.

5. Ляпунов А. М. Об одной теореме теории вероятностей. Одно общее предложение теории вероятностей. Новая форма теоремы о пределе вероятности // Собрание сочинений : в 6 т. М. : Изд-во АН СССР, 1954. Т. 1. С. 125–176.
6. Вешкурцев Ю. М. Автокогерентные устройства измерения случайных процессов / Ом. гос. техн. ун-т. Омск : Изд-во ОмГТУ, 1995. 163 с.
7. Вешкурцев Ю. М., Бычков Е. Д., Титов Д. А. Приложение теории нечетких множеств в цифровой фильтрации случайных сигналов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2004. Вып. 3. С. 3–9.
8. Вешкурцев Ю. М. Прикладной анализ характеристической функции случайных процессов. М. : Радио и связь ; Омск : Изд-во ОмГТУ, 2003. 201 с.
9. Капитонова Т. П. Энергетика и кинематика циклона, прошедшего над ЕТС 8-10 июня 1984 // Метеорология и гидрология. 1986. № 10. С. 45–52.
10. Васильев А. А., Песков Б. Е., Снитковский А. И. Смерчи 9 июня 1984 г. : информ.-метод. письмо. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 40 с.
11. Lyakhov M. Y. Tornadoes in the midland belt of Russia // Soviet Geography. 1987. Vol 28, no. 8. P. 562–570.

УДК 778.64

DOI: 10.25206/2310-4597-2025-1-90-92

Сравнение технологий трехмерной печати фотополимерными материалами

Comparison of three-dimensional printing technologies with photopolymer materials

С. А. Хлыстов

Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

S. A. Khlystov

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Аннотация. Статья посвящена сравнению технологий SLA, DLP и LCD фотополимерной 3D-печати. Рассмотрены принципы работы, преимущества и ограничения каждой из технологий. На основе сравнения технологий предложены рекомендации по выбору оборудования и оптимизации процесса печати для различных прикладных задач. Результаты могут быть использованы в образовательных целях и при внедрении аддитивных технологий в малом бизнесе.

Ключевые слова: 3D-печать, фотополимеры, SLA, DLP, LCD

Abstract. The article is devoted to the comparison of SLA, DLP and LCD technologies of photopolymer 3D printing. The principles of operation, advantages and limitations of each technology are considered. Based on a comparison of technologies, recommendations are offered on the choice of equipment and optimization of the printing process for various applications. The results can be used for educational purposes and in the implementation of additive technologies in small businesses.

Keywords: 3D printing, photopolymers, SLA, DLP, LCD

Введение

Фотополимерная 3D-печать, появившаяся в 1980-х годах с изобретением стереолитографии (SLA) [1], стала основой для создания высокоточных изделий в медицине, инженерии и дизайне [2]. Современные технологии, такие как DLP и LCD, удешевили процесс, сохранив преимущества фотополимеризации, такие как скорость, гладкость поверхности и минимальные отходы.

Несмотря на схожий принцип отверждения смолы УФ-светом, каждая технология имеет уникальные особенности, влияющие на выбор пользователя. Например, LCD-принтеры стали популярны благодаря низкой стоимости, но уступают SLA в долговечности оборудования. Цель работы — провести сравнительный анализ технологий SLA, DLP и LCD, оценив их ключевые параметры: точность, скорость печати, стоимость оборудования, долговечность компонентов и качество поверхности. На основе этого анализа будут предложены рекомендации по выбору оптимальной технологии для различных прикладных задач.

Теория

Фотополимерная 3D-печать объединяет несколько технологий, основанных на избирательном отверждении жидких смол ультрафиолетовым излучением. Несмотря на общий принцип, методы SLA, DLP и LCD существенно различаются в реализации, что определяет их сильные и слабые стороны.

Стереолитография (SLA) – первая технология, разработанная в 1980-х годах. В её основе лежит использование лазера с длиной волны 405 нм, который последовательно сканирует поверхность фотополимерной смолы, формируя контуры каждого слоя. Точность позиционирования лазера обеспечивается гальванометрическими зеркалами, что позволяет достигать разрешения до 25 мкм. Оборудование SLA-принтеров включает резервуары из кварцевого стекла, минимизирующие рассеивание света, и платформу, которая постепенно погружается в смолу по мере отверждения слоёв. Эта технология идеально подходит для задач, требующих микроточности, таких как создание стоматологических моделей, ювелирных изделий или микрофлюидных чипов. Однако высокая стоимость оборудования и низкая скорость печати, обусловленная пошаговым сканированием, ограничивают её применение в массовом производстве.

Цифровая обработка света (DLP), в отличие от SLA, использует проектор, который проецирует целое изображение слоя на смолу, отверждая его одновременно по всей площади. Это сокращает время печати в 2–5 раз по сравнению с SLA, хотя разрешение снижается из-за пикселизации проектора. Технология DLP получила распространение в прототипировании, архитектурном макетировании и создании художественных объектов, где важна скорость без существенной потери детализации. К недостаткам можно отнести появление ступенчатых артефактов на наклонных поверхностях и ограниченную площадь печати, связанную с разрешением проектора. Тем не менее, DLP остаётся популярной благодаря балансу между скоростью, качеством и стоимостью оборудования.

Маскированная фотополимеризация (LCD) стала доступной альтернативой DLP и SLA за счёт использования ЖК-матрицы в качестве динамической маски. УФ-светодиоды подсвечивают экран, который блокирует свет в областях, не требующих отверждения. Это позволяет формировать слои по качеству, сопоставимым с DLP, но при значительно меньшей стоимости принтеров. LCD-устройства, такие 3D-принтеры широко применяются в образовании, производстве сувениров и печати деталей с умеренными требованиями к точности. Однако ЖК-экраны подвержены быстрому износу из-за постоянного воздействия УФ-излучения (срок службы 1000 часов), а низкая контрастность матрицы может ухудшать чёткость границ.

Таким образом, выбор между SLA, DLP и LCD зависит от приоритетов: максимальная точность, скорость или экономичность. Каждая технология занимает свою нишу, что делает фотополимерную печать гибким инструментом для разнообразных задач.

Результаты

Для наглядного сопоставления технологий SLA, DLP и LCD рассмотрим их основные параметры, влияющие на качество печати, экономическую эффективность и область применения. Сравнение проведено по таким критериям, как точность, скорость, стоимость оборудования, долговечность компонентов и качество поверхности. Результаты представлены в табл. 1, которая позволяет систематизировать различия и сделать обоснованный выбор технологии под конкретные задачи.

Таблица 1

Сравнение технологий фотополимерной 3D-печати

Параметр	SLA	DLP	LCD
Точность	Высокая	Средняя	Средняя
Скорость печати	Низкая (пошаговое сканирование)	Высокая (одновременное отверждение слоя)	Высокая (аналогично DLP)
Стоимость оборудования	Высокая	Средняя	Низкая
Долговечность компонентов	Высокая (кварцевое стекло, лазер 10000 часов)	Средняя (лампа проектора 5000 часов)	Низкая (ЖК-экран 1000 часов, УФ-матрица 40000 часов)
Энергопотребление	Высокое	Среднее	Низкое
Требования к смолам	Специализированные	Стандартные	Бюджетные
Качество поверхности	Максимально гладкая	Хорошее, возможны артефакты	Хорошее, но зависит от матрицы
Области применения	Микроточные изделия (стоматология, ювелирка)	Прототипирование, архитектурные макеты	Образование, сувениры, детали средней точности

Выводы и заключение

Среди методов фотополимерной печати LCD-технология демонстрирует наиболее сбалансированное сочетание экономичности, скорости и качества, что делает её привлекательным выбором для широкого круга пользователей. Рассмотрим подробнее особенности данной технологии.

1. Экономическая эффективность

о LCD-принтеры существенно **дешевле** аналогов, что делает их оптимальным решением для образовательных учреждений, стартапов, малого бизнеса и частных пользователей.

о Использование недорогих расходных материалов снижает себестоимость печати.

2. Оптимальная скорость

о Современные LCD-принтеры с монохромными экранами обеспечивают **высокую скорость печати** (1–3 секунды на слой), приближаясь к показателям более дорогих DLP-принтеров.

о Технология позволяет эффективно печатать как единичные изделия, так и небольшие партии.

3. Достаточное качество для большинства задач

о Разрешение удовлетворяет требованиям большинства прикладных задач.

о Совершенствование ЖК-матриц позволяет минимизировать дефекты печати.

4. Простота использования и обслуживания

о LCD-принтеры отличаются **понятным интерфейсом** и простотой калибровки.

о Замена изнашиваемых компонентов (например, ЖК-экрана) не требует значительных затрат.

Области применения

LCD-печать уже активно используется:

- В **образовании** – благодаря низкой стоимости и простоте освоения.
- В **малом бизнесе** – для производства сувенирной продукции, прототипов и функциональных деталей.
- В **хобби-печати** – как наиболее доступная технология для начинающих.

Перспективы развития

Дальнейшее совершенствование LCD-технологии, включая повышение разрешения экранов и расширение ассортимента смол, открывает новые возможности для её применения в профессиональных областях.

Вывод: LCD-печать – это технология, которая сочетает в себе **доступность, удобство и достаточное качество**, что делает её отличным выбором для тех, кто хочет начать работать с 3D-печатью без значительных инвестиций. Её развитие позволяет прогнозировать дальнейшее расширение сфер использования.

Список источников

1. Новиков С. В., Рамазанов К. Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы : учеб. пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа : Изд-во УГАТУ, 2022. 75 с. ISBN 978-5-4221-1577-8. EDN CYIXHH.
2. Шкрум А. С., Катасонова Г. Р. Тенденции применения аддитивных технологий в различных предметных областях и в медицинской сфере. DOI: 10.25694/URMJ.2020.05.38 // Уральский медицинский журнал. 2020. № 5 (188). С. 216–220. EDN NVQJGY.
3. Анализ факторов, оказывающих влияние на нарушение геометрии изделий в процессе аддитивного построения / А. В. Голунов, Л. Г. Варепю, А. С. Голунова, С. А. Щеглов. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-1-557-558 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 557–561. EDN CEFSXZ.